

**Titre:** Modélisation et simulation de la trajectoire des patients en  
Title: radiothérapie

**Auteur:** Yosra El Abed  
Author:

**Date:** 2017

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** El Abed, Y. (2017). Modélisation et simulation de la trajectoire des patients en  
Citation: radiothérapie [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/2619/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/2619/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Louis-martin Rousseau, & Nadia Lahrichi  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en génie industriel  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DES PATIENTS EN  
RADIOTHÉRAPIE

YOSRA EL ABED

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INDUSTRIEL)

JUIN 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA TRAJECTOIRE DES PATIENTS EN  
RADIOTHÉRAPIE

présenté par : EL ABED Yosra

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D., président

M. ROUSSEAU Louis-Martin, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme LAHRICHI Nadia, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme FORTIN Marie-Andrée, Ph. D., membre

## DÉDICACE

*A ma chère mère Warda,  
Nulle dédicace ne saurait exprimer ce que je te dois  
Tu es la source de mes joies, le secret de ma force  
Je ne te remercierai jamais assez pour ton amour et ton courage.*

*A Mon cher père Ahmed,  
Mon idole  
Qui m'a soutenu depuis mes premiers pas  
Pour tes sacrifices, ta bienveillance et ton affection  
Que Dieu tout puissant te préserve et te procure santé et longue vie.*

*A mes sœurs et mes frères,  
Je vous souhaite un avenir plein de bonheur, de réussite et de sérénité.*

*A ma famille,  
Mes amis,  
Mes professeurs,  
Je vous dédie ce modeste travail...*

## REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le fruit d'un travail qui n'aurait pu être possible sans l'aide des personnes clés qui m'ont soutenu durant les dernières années. Je désire leur adresser mes plus sincères remerciements.

Tout d'abord, je tiens à remercier Monsieur Louis-Martin Rousseau, en tant que Directeur de recherche, pour son encadrement et sa disponibilité tout au long du travail de recherche ainsi qu'au cours de la rédaction de ce mémoire. Mes remerciements s'adressent également à ma co-directrice, Madame Nadia Lahrichi qui a su me conseiller et me guider à travers toutes les épreuves de mon parcours. Son expertise dans le milieu de la santé, ses nombreuses opportunités de projets ainsi que tout le soutien offert m'ont permis de mener à terme ce projet d'envergure.

J'exprime ma gratitude à toute l'équipe du département de radio-oncologie du « Centre hospitalier Universitaire Notre Dame » et du « Centre Intégré de Cancérologie de Laval » qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche en me permettant de collaborer à leur projet d'unité de recherche traité dans ce mémoire.

Finalement, je tiens à remercier ma famille, mes amis, pour ses écoutes, ses supports moraux, ses corrections ainsi que ses nombreux encouragements pendant ces deux années.

## RÉSUMÉ

### **Modélisation et Simulation de la trajectoire des patients en radiothérapie**

De nombreux traitements existent afin de lutter contre le cancer. Parmi les plus répandus, nous notons la chirurgie, la chimiothérapie et la radiothérapie. Cette dernière est considérée comme une référence étant donné que près de la moitié des patients ont passé par une phase de radiothérapie seule ou combinée durant leur régime de traitement. Le processus complet associé à cette technique implique une organisation complexe du point de vue des ressources et des flux des patients. Les réels enjeux d'une optimisation de ces processus sont multiples. En ce qui concerne les patients, l'enjeu majeur concerne la qualité des soins qui leur sont apportés et la minimisation des délais d'attente. En effet, diminuer ou éliminer les temps d'attente avant l'accès aux traitements signifie une meilleure qualité de service rendu au patient, mais également, une augmentation du nombre des patients pris en charge, et par conséquent, un accroissement de l'efficacité de fonctionnement du centre de traitement.

Depuis quelques dizaines d'années, les méthodes de recherche opérationnelle et les techniques de l'ingénierie industrielle font leur apparition dans le milieu hospitalier afin d'améliorer la performance de ces systèmes opératoires. En particulier, la radiothérapie présente une problématique intéressante liée à la conjonction de la rareté des ressources et à la complexité de la synchronisation de la trajectoire des soins. La résolution de ces problèmes nécessite une adoption de bonnes pratiques assurant d'une part, l'optimisation de la trajectoire des patients et d'autre part l'utilisation efficace des ressources disponibles. Dans ce contexte, les cliniques se sont retournées vers les outils d'aide à la décision. Parmi ces derniers, notons un outil permettant de modéliser toute la trajectoire des patients et comparer plusieurs politiques de gestion tout en étudiant leur impact sur la performance globale du système.

Nous abordons cette question en débutant par une revue de la littérature sur la modélisation, la simulation et la planification en radiothérapie. Bien que cette étude se révèle limitée dans le contexte du processus complet, plusieurs approches ont été élaborées afin de traiter des parties du processus. En outre, elles sont appliquées à un cas spécifique lié à un seul centre de traitement. Dans cette optique, vient l'idée de ce projet ayant comme objectif le développement d'un modèle de simulation générique.

Dans la première partie de ce travail, confronté aux limites du cadre de modélisation utilisé jusqu'à aujourd'hui, nous avons développé une modélisation originale de la trajectoire des patients permettant une représentation plus fidèle de la réalité au niveau des flux physiques des patients, des ressources, des tâches, etc. En particulier, un langage de modélisation de processus normalisé (BMPN) a été utilisé pour élaborer une cartographie permettant de mieux comprendre le parcours d'un patient et sa trajectoire. Dans la deuxième partie, cette cartographie a été reproduite avec le langage de programmation Java et implémenté dans le modèle de simulation afin de pouvoir évaluer plusieurs nouvelles stratégies de gestion.

Le simulateur obtenu nous a permis de modéliser et simuler la trajectoire des patients ainsi que leurs interactions avec les ressources tout en conservant la qualité de représentation de la réalité. En outre, il a permis de constater et d'évaluer l'impact de plusieurs scénarios par rapport aux différents indicateurs de performance. Finalement, la simulation du système radio-oncologique nous a abouti à prévoir des recommandations que nous avons jugé fiable, après la phase de validation, assurant l'amélioration de la qualité des soins apportés aux patients par la diminution des délais de prise en charge et le respect des temps d'attentes prescrits par la grille de classification.

**Mots-Clés : Modélisation, simulation, radiothérapie, trajectoires, stratégies et modèles de planification, ressources**

## ABSTRACT

### **Modeling and simulation of patient trajectory in radiotherapy centers**

In the fight against cancer, major path are surgery, chemotherapy and radiotherapy. Radiation therapy is recognized as a reference since more than 50% of the patients received radiation during their treatment regimen. The treatment process associated with this technique involves a complex organization as regards as resources and patient flows. Concerning radiotherapy centers, they need to reduce treatment cost and manage resources utilization while keeping better quality of service. Regarding patients, major concern is quality of the care they receive and improvement of waiting time. In fact, reducing or eliminating waiting time before access to treatment means better quality of service to the patient, but also an increase in the number of treated patients, and consequently in the efficiency of treatment.

Since several decades, operational research methods and industrial management techniques have appeared in healthcare. In particular, radiotherapy care trajectories are interesting because of the combination of critical resources and multiples care activity repetition. The resolution of these problems requires the adoption of good practices ensuring on the one hand the optimization of the trajectory of patients and on the other hand the efficient use of available resources. In this context, clinics have turned to decision-making tools. Among these, a tool that can model the entire patient trajectory and compare several management policies while studying their impact on the overall performance.

We address this issue by starting with a review of the literature on modeling, simulation and planning in radiotherapy. Although several promising approaches have been developed, literature in this filed is scare. In fact, the majority of study reviewed handle only some phases of the process. In addition, they are applied to a specific case related to a single treatment center. In this perspective that this project was born with the objective of developing a generic simulation model.

In the first part, we have developed an original model of the trajectory of patients allowing more accurate representation of reality of the processes. In particular, a standardized process modeling language (BMPN) was used to develop a precise mapping to better understand a patient's trajectory. In the second part, this mapping was reproduced and implemented in Java in order to evaluate several new management strategies.



The simulator that we developed allowed us to simulate the trajectory of patients as well as their interactions with resources. In addition, it was possible to observe and evaluate the impact of several scenarios in terms of the objectives of centers, quantified using appropriate indicators such as waiting time. Finally, using the knowledge accumulated during the simulation of different scenarios, we made recommendations ensuring the improvement of quality of care given to patients by reducing delays and maximizing the uses of existing resources.

**Keywords:** Modeling, simulation, radiotherapy, trajectories, planning strategies, resources

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES .....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XV
LISTE DES ANNEXES .....	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	6
2.1 Modélisation appliquée au milieu hospitalier .....	6
2.2 Simulation à évènements discrets .....	10
2.2.1 SED en radiothérapie .....	11
2.3 Organisation des rendez-vous en santé .....	14
2.3.1 Travaux de planification en radiothérapie.....	15
2.4 Synthèse bibliographique et problématiques couvertes .....	19
2.4.1 Limites de la littérature .....	19
2.4.2 Problématique de modélisation et de simulation de la trajectoire des patients en radiothérapie.....	20
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET CHOIX DES OUTILS.....	23
3.1 Méthodologie de conduite d'une simulation .....	23
3.2 Choix des outils de la modélisation et de la simulation .....	24
3.2.1 Justification d'utilisation de la méthode de modélisation .....	24
3.2.2 Justification d'utilisation de la méthode de simulation.....	27

CHAPITRE 4	MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE DE SIMULATION GÉNÉRIQUE.....	29
4.1	Étude, collecte des données et modélisation du flux des patients.....	29
4.1.1	Flux des patients au CICL/CHUM.....	29
4.1.2	Flux des patients présentés dans quelques études de recherche.....	31
4.1.3	Politique de gestion des rendez-vous .....	32
4.1.4	Définition de la cartographie standard .....	37
4.2	Implémentation informatique.....	39
4.2.1	Hypothèses .....	39
4.2.2	Description du modèle de simulation.....	41
CHAPITRE 5	VALIDATION DU MODÈLE ET RÉSULTATS .....	52
5.1	Vérification et validation.....	52
5.1.1	Vérification du modèle.....	52
5.1.2	Validation du modèle .....	53
5.1.3	Aspect générique du modèle .....	57
	• Abstraction du modèle .....	58
	• Programmation .....	58
	• Réutilisabilité du modèle.....	59
5.2	Résultats .....	59
5.2.1	Scénario initial.....	60
5.2.2	Scénarios « <i>What-if</i> » .....	65
5.3	Discussion et Recommandations.....	85
5.4	Conclusion et perspectives .....	86
5.5	Limites du modèle de simulation .....	87
CHAPITRE 6	CONCLUSION .....	89

BIBLIOGRAPHIE .....	92
ANNEXES .....	99

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Principaux travaux étudiés dans la modélisation .....	10
Tableau 2.2: Publications sur des problématiques de simulation en radiothérapie.....	14
Tableau 2.3: Publications sur des problématiques de planification en radiothérapie .....	18
Tableau 3.1: Comparaison entre les langages de programmation et les outils de simulation.....	28
Tableau 4.3: Temps d'exécution de chaque tâche définie .....	46
Tableau 4.4: Règles de priorité implémentées dans le simulateur .....	49
Tableau 5.1: Patients traités et proportion de retard.....	56
Tableau 5.2: Abréviations des délais entre les phases de traitement .....	60
Tableau 5.3: Jour de référencement des patients en retard pour le premier traitement.....	62
Tableau 5.4: Organisation initial des activités pour les oncologues du CICL .....	66
Tableau 5.5: Nouvelle Organisation des activités pour les oncologues du CICL.....	67
Tableau 5.6: Patients traités et proportion de retard pour le scénario 1 .....	68
Tableau 5.7: Proportion de retard pour le scénario 2 .....	71
Tableau 5.8: Proportion de retard pour le scénario 3 .....	72
Tableau 5.9: Patients traités et proportion de retard pour le scénario 4 .....	74
Tableau 5.10: Patients traités et proportion des retards pour le scénario 5 .....	76
Tableau 5.11: Patients traités et proportion de retard pour le scénario 6 .....	78
Tableau 5.12: Différents alternatives de poids .....	82
Tableau 5.13: Patients traités et proportion de retard dans les 4 alternatives pour le scénario 7 ...	82
Tableau 5.14: Résumé des scénarios .....	84

## LISTE DES FIGURES

Figure 3.1: Les étapes du processus de simulation (Ricordel et Deamzou (2000)) .....	23
Figure 3.2: Les plateformes utilisées en SED (Almagooshi, 2015) .....	27
Figure 4.1: Les opérations de prise en charge d'un patient en radiothérapie .....	29
Figure 4.2: Processus de soins en radiothérapie-AMC .....	31
Figure 4.3: Les activités du plan de traitement .....	35
Figure 4.4: Schéma simplifié du processus en radiothérapie .....	38
Figure 4.5: Modèle conceptuel de la trajectoire du patient dans le simulateur .....	42
Figure 4.6: Modèle des trajectoires .....	43
Figure 4.7: Package « scheduling » dans le simulateur .....	45
Figure 4.8: Principe de fonctionnement .....	47
Figure 4.9: Package d'évènements .....	48
Figure 5.1: Processus d'implémentation et de vérification .....	53
Figure 5.2: Série chronologique montrant le nombre des patients dans la file d'attente pour un premier traitement .....	54
Figure 5.3: Comparaison de taux d'occupation des accélérateurs linéaires .....	56
Figure 5.4: Temps d'accès pour les quatre catégories des patients .....	60
Figure 5.5.a : Délai entre les rendez-vous des patients palliatifs P1 .....	61
Figure 5.6: Délai entre les rendez-vous des patients curatifs P3 .....	62
Figure 5.7: Délai entre les rendez-vous des patients curatifs P4 .....	63
Figure 5.8: Évolution des plages utilisées pour chaque accélérateur linéaire .....	64
Figure 5.9: Nombre de plages des scanners utilisées par jour en moyenne .....	65
Figure 5.10: Délai entre la consultation et le premier traitement pour les curatifs 14 .....	69
Figure 5.11: Délai entre la consultation et le premier traitement pour les curatifs 28 .....	69

Figure 5.12: Temps d'accès maximal pour les différents types de cancer chez les patients curatifs .....	71
Figure 5.13: Comparaison des temps d'accès pour les curatifs 14 et les curatifs 28 .....	73
Figure 5.14: Comparaison de taux d'occupation des accélérateurs linéaires entre l'état actuel et le scénario 4.....	74
Figure 5.15: Délai entre les rendez-vous des patients curatifs 14 (P3) .....	77
Figure 5.16: Comparaison des temps d'accès pour les curatifs 14 et les curatifs 28 .....	79
Figure 5.17: Temps d'accès pour les quatre catégories .....	83

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

P1	Patient de priorité «1»
P2	Patient de priorité «2»
P3	Patient de priorité «3»
P4	Patient de priorité «4»
CHUM	Centre Hospitalier Universitaire à Montréal
CICL	Centre Intégré de Cancérologie de Laval
BPMN	Business Process Model and Notation
SSJ	Stochastic Simulation JAVA



## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A – CARTOGRAPHIE STANDARD DE LA TRAJECTOIRE DES PATIENTS EN RADIOTHÉRAPIE .....	99
ANNEXE B – SCHÉMA D'ÉTAPES DE TRAITEMENT D'UN PATIENT .....	100

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

D'après les statistiques du Ministère de la Santé et des Services Sociaux (MSSS), en moyenne au Québec, toutes les 3 minutes, quelqu'un apprend qu'il est atteint d'un cancer et toutes les 10 minutes, quelqu'un en meurt. Ce qui fait que le cancer est classé comme étant la première cause potentielle de mortalité. En 2013, la Coalition Priorité Cancer a fait un rapport portant sur la répartition des coûts des maladies chroniques dans le système de santé québécois et les coûts économiques du traitement de cancer est d'environ 4200 en million de dollars [1].

Dans les pays développés, la radiothérapie est l'une des techniques les plus couramment utilisées dans le traitement du cancer, ainsi que la chirurgie et la chimiothérapie. Au Québec, le sondage « Enquête québécoise sur la qualité des services de lutte contre le cancer » fait par l'Institut de la Statistique du Québec, présente la répartition des types de traitement pris pour un échantillon de 31160 patients entre 2004 et 2006. L'étude montre que près de la moitié des patients, ont eu un traitement de radiothérapie seul ou combiné [2].

Plus récemment, de nombreuses recherches cliniques sont proposées comme celle de (Chen et al., (2008)). Ils ont effectué une analyse détaillée de 44 études entre 1975 et 2005 et ont montré une corrélation significative entre les délais d'attente et les taux de guérison pour la quasi-totalité des cas étudiés. Conforté par ce constat, le collège des médecins du Québec (CMQ) a fait approuver une grille de classification donnant des délais de traitement bien précis selon les priorités des patients. Notons que, pour un patient référé à un département de radio-oncologie, le délai est défini par un temps d'accès qui est le temps écoulé en jours entre la date de référencement et celle de premier traitement. La priorité 1 correspond aux patients urgents considérés en danger de mort et ayant juste un jour pour commencer le traitement. La priorité 2 représente les patients palliatifs qui sont dans le stade terminal du cancer et doivent accéder en 3 jours maximum aux traitements pour soulager les douleurs. Les priorités 3 et 4 correspondent aux patients curatifs dont les délais d'accès différencient ces deux priorités [3]: quatorze jours pour les patients curatifs de type 3 et 28 jours pour les autres de type 4. Evidemment, cette grille est stricte en termes de délais, en particulier pour les patients urgents et palliatifs et le fait de répondre aux échéances représente un enjeu indispensable et important dans l'efficacité des centres radio-oncologiques.

En analysant la revue scientifique, le développement de cette technique de traitement met à jour un ensemble de nouvelles problématiques qui ont été explorées par les chercheurs en radiothérapie. Ces études de recherche se sont organisées en 3 grandes axes que nous proposons regrouper suivant les problématiques suivantes :

- Les problématiques médicales ;
- Les problématiques technologiques ;
- Les problématiques de gestion et d'organisation.

Notons que les travaux présentés dans ce projet s'intéressent aux problématiques de gestion et d'organisation qui se découlent, principalement, des contraintes imposées sur les centres radio-oncologiques. Ces contraintes sont la rareté et le coût de fonctionnement des ressources intervenant au cours de prise en charge des patients et la complexité de la définition des fonctions associées à chaque ressource humaine afin d'éviter une lourde charge de travail. Selon une étude faite par l'Institut canadien d'information sur la santé (ICIS) [3], une pénurie de professionnels de la santé est prévue au Canada. En effet, même si le nombre des professionnels a augmenté légèrement au cours des dix dernières années, l'augmentation n'a pas suivi la croissance démographique canadienne. En radiologie, une pénurie de 500 technologues risque de se manifester au Québec à cause des retraites massives dans les années prochaines. Concernant les besoins en équipement de radiothérapie, l'Association Canadienne des Radiologistes (CAR) [5] a demandé au gouvernement fédéral d'investir immédiatement dans l'achat de matériel d'imagerie médicale ainsi que les accélérateurs linéaires dont la province du Québec a besoin.

En ce qui concerne la gestion des flux, la difficulté de synchroniser une trajectoire de soins de façon à minimiser les temps d'attente représente aussi, une problématique complexe. Généralement, le processus s'étend, principalement, sur deux phases soient le prétraitement et le traitement, en lui-même, qui consiste à l'irradiation de la tumeur. Précisément, le but du prétraitement est de définir la zone à traiter et de générer un plan de traitement définissant la dose à diffuser aux cellules affectées par la tumeur durant le traitement.

Dans le prétraitement de la radiothérapie, chaque patient suit une séquence ordonnée d'exams, appelée trajectoire, constituée d'un certain nombre d'opérations. La trajectoire est déterminée en fonction de la priorité du patient ainsi que le type du cancer. Cette phase est assurée par un groupe multidisciplinaire de spécialistes ayant des fonctions multiples. Ces ressources ne sont pas

disponibles en permanence tout au long de l'horizon de planification car leurs horaires sont partiellement remplis avec d'autres rendez-vous. Dans cette phase, les patients sont admis sur une base quotidienne et un calendrier réalisable doit être généré pour chacun d'eux et pour chaque phase, de façon à réduire les temps d'attente afin d'accélérer l'accès à la phase de traitement. La création de ces calendriers est un processus complexe dans lequel, il faut assurer la qualité des soins fournis et prendre en considération plusieurs facteurs à savoir l'arrivée stochastique des patients et la disponibilité limitée des ressources.

En outre, l'étape de traitement présente une complexité particulière en terme de planification des traitements. Cette étape, représente le cœur de la trajectoire avec son intérêt médical, sa durée et sa complexité de planification, elle est l'élément central de création de la valeur ajoutée pour le patient et le centre. En effet, la gestion des rendez-vous sur les accélérateurs linéaires constitue, elle-même, un problème complexe où il faut attribuer un nombre fixe de traitements qui varie entre 5 et 44 tout en respectant les délais fixés par la grille de classification. La priorité des patients, les délais de traitement, la variabilité du nombre de traitements, la disponibilité des ressources font en sorte que ce problème est très difficile à gérer dans un centre radio-oncologique.

Donc, la gestion et la planification de la trajectoire des soins, en radiothérapie, révèlent d'une problématique complexe. Dans ce contexte, les principales sous-problématiques, que nous pouvons identifier dans la gestion de la trajectoire en radiothérapie concernent :

- La **définition et la modélisation des trajectoires des patients** décrivant des activités de soins qui sont le plus souvent dépendantes des ressources qui les réalisent ;
- La **planification et la gestion des rendez-vous** des patients tout au long du processus;
- La **coordination entre les ressources** de façon à assurer une harmonisation dans le passage des flux des patients entre les différentes phases. D'ailleurs, les trajectoires appartiennent à une chaîne logistique dont l'avancement dépend de la réalisation de chacune des étapes dans l'ordre adéquat et dans les délais définis par la grille de classification.

La résolution de ces problèmes nécessite, dans la majorité de cas, un changement d'organisation. Pour une gestion efficiente de la trajectoire des soins en radiothérapie, il paraît indispensable de développer des nouveaux outils d'aide à la décision pouvant comparer les différentes stratégies et prévoir l'impact de chacune sur le système complet et surtout sur les temps d'attente des patients. Autrement dit, un outil d'aide à la décision pouvant modéliser l'ensemble des flux dans les centres

radio-oncologiques et simuler par la suite, l'impact des stratégies de planification, des politiques d'affectation des ressources, des règles de priorités, etc.

En analysant la revue de la littérature portant sur la modélisation, la simulation et la planification en radiothérapie, nous notons que la majorité des études citées ne traitent qu'une partie du processus complet et présentent une tendance à l'utilisation d'ARENA et Netlogo (Almagooshi, (2015)). En particulier, la plupart sont associées à la planification de nombreux traitements qui doivent être effectués sur plusieurs jours ou semaines et sur un accélérateur linéaire. Aussi, elles sont appliquées à un cas spécifique lié à un centre de traitement unique. Ces conclusions ne peuvent pas, donc, être directement généralisées à d'autres situations impliquant des contextes différents dans d'autres centres radio-oncologiques (Santibanez et al., (2009)).

Ainsi, notre mission est de développer un modèle de simulation générique permettant de modéliser les différentes trajectoires des patients en radiothérapie afin d'exécuter des analyses de scénarios pour différentes cliniques et centres et d'évaluer les impacts de changements aux processus et aux politiques sur les temps d'attente ainsi que sur l'utilisation des ressources. Cet outil pourrait aussi automatiser la planification de rendez-vous tout au long du processus de prise en charge d'un nouveau patient. Pour la modélisation des trajectoires, nous adoptons « BPMN » comme langage de référence standard permettant de capturer le système étudié et exposer les flux spécifiques, y compris les trajectoires des patients, la gestion des ressources et la définition des acteurs impliqués. Pour le simulateur, nous choisissons d'opter pour le langage de programmation orientée objet « Java » et non pas le logiciel « Arena » afin d'assurer d'une part la flexibilité nécessaire au modèle de simulation et d'autre part l'intégration des modules d'optimisation. En particulier, nous étudions deux cas réels en collaboration avec le Centre Intégré de Cancérologie de Laval (CICL) et le Centre Hospitalier Universitaire à Montréal (CHUM). En bref, ce projet est destiné à montrer les avantages d'une approche intégrée de « BPMN » et de la simulation, comme un soutien précieux pour les processus décisionnels impliqués dans la gestion des centres radio-oncologiques.

Le présent travail débute par une revue de la littérature touchant différents aspects liés à la modélisation, à la simulation. Nous notons que le service des soins, en radiothérapie, est fourni aux patients sous forme d'un ensemble des rendez-vous avec différentes ressources. C'est pourquoi, nous allons étudier les politiques de prise de rendez-vous appliquées dans les cliniques. Ensuite, le

troisième chapitre exposera les différents outils à utiliser durant le projet ainsi que, la méthodologie utilisée dans l'implémentation du modèle de simulation.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons deux contributions liées à la mise en place d'une cartographie standardisée et l'implémentation d'un simulateur générique, que nous pouvons utiliser pour différents centres radio-oncologiques suite à des modifications dans quelques paramètres d'entrées. Le cinquième chapitre, décrit les étapes suivies pour valider notre simulateur. En effet, les résultats de l'application du modèle aux données cliniques réelles du CICL de l'année 2012 et aux listes d'attente sont donnés et comparés rétrospectivement à la pratique actuelle. Cet outil permettra par la suite de lancer des scénarios « What if » pour évaluer l'impact de changements dans l'organisation et la gestion des services et présenter des recommandations fiables et des constats à propos le modèle de simulation développé.

Finalement, nous conclurons sur les principales contributions et énoncerons quelques perspectives de recherche.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans cette partie, une revue de la littérature sur l'application de la modélisation et de la simulation en radiothérapie sera présentée. Au-delà des approches de modélisation et de simulation, un aperçu de l'état de l'art portant sur l'organisation des rendez-vous et la gestion des services en radiothérapie est proposé.

### 2.1 Modélisation appliquée au milieu hospitalier

L'évolution clinique d'un patient en radiothérapie peut être décomposée en une suite d'opérations qui correspondent aux différents traitements de suppléance. Afin de mieux connaître puis d'optimiser les trajectoires suivies par les patients, il est nécessaire de mettre au point des techniques permettant de capturer et modéliser les flux complexes. Plus précisément, les problèmes liés à la modélisation des systèmes hospitaliers peuvent intervenir dans deux contextes différents (Chabrol et al., (2006b)) : lors de la conception et l'implémentation d'une nouvelle organisation (la conception a priori) et/ ou lors de réaménagement d'un système déjà existant (la conception a posteriori). Quel que soit le contexte, la modélisation est définie comme étant la première étape dans un projet d'aide à la décision (Kowalsky, (2006)). La modélisation est, donc, la première phase de toute étude visant l'ingénierie ou la reconfiguration d'un système, soit hospitalier ou non. Elle permet de comprendre le fonctionnement de l'organisme étudié et de connaître les conséquences des décisions avant de les appliquer tout en offrant la possibilité d'évaluer de nouvelles politiques de gestion et de pilotage du système complet. L'objectif de la modélisation ne se limite pas à la reproduction de la réalité, mais plutôt à la compréhension des mécanismes qui lient les causes aux phénomènes.

Suite à l'augmentation considérable du volume des patients, Colin et al., (2004), a démontré son intérêt à l'utilisation de la modélisation dans les systèmes hospitaliers pour d'autres motivations qui sont :

- Permettre de placer le patient au centre des préoccupations et de mieux comprendre son parcours et sa trajectoire au sein de l'hôpital ;
- Fournir une meilleure gestion des flux des patients ;
- Faciliter les flux d'échanges entre les différents acteurs tout en assurant une meilleure compréhension de la contribution de chacun dans le processus de prise en charge du patient.

Dans la littérature, Fortin et al., (2005), a distingué trois types de travaux s'intéressant à la modélisation des flux des patients à l'hôpital selon leurs objectifs :

- **Modélisation des flux des patients afin d'élaborer des outils de simulation**

El oualidi et al., (2010), ont réalisé une étude visant la maîtrise des facteurs ayant un impact significatif sur l'allongement du temps de passage des patients au service des urgences. Leur objectif principal de la modélisation des trajectoires des patients était de développer un outil de simulation permettant de tester et valider des différentes stratégies de pilotage afin de minimiser le délai moyen de séjour au service d'accueil des urgences du Centre Hospitalier Universitaire « Ibn Rochd » de Casablanca. Dans cette étude, l'apport de la modélisation était essentiellement de permettre la représentation de la structure et du fonctionnement du système. Par ailleurs, elle sert comme un support de communication entre les différents acteurs du projet, pour préparer une définition collective du fonctionnement cible de l'organisation. Pour réaliser cette modélisation, ils ont opté à la méthode SADT « *Structured Analysis and Design Technique* ». Néanmoins, cette méthode a des limites: sa nature descriptive et statique ne permet pas d'évaluer la performance de l'organisation et du processus de prise en charge. Par conséquent, elle ne permet pas non plus de tester d'autres stratégies de réorganisation de ce processus.

En Colombie, Navas et al., (2004), ont présenté un travail de modélisation des flux des patients du service d'urgence. Dans cette étude, un modèle à base de Réseaux de Pétri de haut niveau des flux des patients a été élaboré afin de mettre en évidence les problèmes et les difficultés liés à la simulation du système complet. Les Réseaux de Pétri ont été choisis comme étant un outil de modélisation ayant une habilité à décrire des processus asynchrones, concurrents et séquentiels structurés à un langage formel et graphique.

Belaidi et al., (2007), ont exposé un travail dont le but est de montrer l'intérêt du couplage des méthodes de modélisation d'entreprise et de simulation de flux, pour la réorganisation et le pilotage des processus de prise en charge des patients. En effet, l'utilisation de la modélisation a permis de passer d'une connaissance tacite du fonctionnement du service à une connaissance collective permettant de mieux comprendre les dysfonctionnements organisationnels. En outre, l'outil dynamique de simulation développé, a permis d'évaluer la performance de l'organisation actuelle. Lors de cette étude, ils ont constaté des problèmes de synchronisation et de coordination avec l'extérieur du service, plus précisément avec les services en amont et en aval assurant des actes de



prise en charge. La finalité du travail est de tester différentes stratégies de pilotage et de dimensionner une nouvelle organisation mieux adaptée pour réduire les temps d'attentes.

- **Modélisation du parcours des patients avec l'objectif d'évaluer les modes d'organisation du travail**

Face à une augmentation importante de nombre des patients, Wieser et al., (2002), ont proposé une étude logistique pour garantir la performance du système hospitalier et assurer la qualité des prestations. Cette étude qui est basée sur une phase de modélisation et d'analyse systématique des flux des patients, a permis de mettre en évidence une sous optimisation de l'allocation des ressources et une désynchronisation entre les flux physiques et logiques générant un manque de traçabilité tout au long du processus. Cette étude a conduit à une reconfiguration des locaux afin d'assurer une meilleure utilisation des ressources (humaines et matérielles), à une réduction des temps d'attente des patients et à une anticipation du comportement du « système » en fonction de sa charge. En outre, ils ont défini un nouveau concept du système d'information visant à améliorer la saisie des données et la traçabilité des patients.

Au Québec (Canada), Trudeau (2004), a utilisé comme outils de modélisation, deux diagrammes de flux dont le premier est le diagramme du « patient sans garde en établissement » et le deuxième est le diagramme du « patient avec garde en établissement ». Ces deux diagrammes ont été réalisés pour préciser les risques présents dans le système complet en urgence. Les résultats obtenus militent en faveur du bien-fondé de la présence d'un agent de liaison en santé mentale à la salle d'attente.

Plus récemment, Baril et al., (2015), ont montré que la modélisation des systèmes de santé, en radiothérapie, est caractérisée par une forte implication humaine, tant au niveau des ressources (médecin, infirmières, etc.) qu'au niveau des patients. Les ressources humaines, dans le secteur de la santé, sont exposées aux multitâches et aux multiples interruptions. Par conséquent, lorsqu'une ressource a terminé l'intervention avec un patient, elle ne rencontre pas nécessairement le suivant. En effet, les tâches directes sont souvent alternées avec des tâches indirectes telles qu'écrire au dossier, discuter avec la famille, discuter avec un collègue, consulter le dossier du prochain patient, etc. Contrairement au secteur manufacturier, les ressources dans les systèmes de santé ont une liberté professionnelle qui leur permet de décider les tâches à effectuer et dans quel ordre elles doivent être réalisées.

- **Modélisation du parcours des patients afin de construire un tableau de bord (indicateurs de performance)**

Celia et al., (2016), ont développé une cartographie, décrivant la trajectoire du patient à travers le système hospitalier étudié. Cet article explore comment une modification dans les indicateurs de performance des organisations de soins, a été mise en place d'une manière acceptable pour les personnes impliquées. Les résultats ont révélé que cette modification a été couronnée de succès en raison de la participation des professionnels au processus de changement en cours. Cette implication a réduit leur tendance naturelle à résister et a renforcé l'engagement des différents groupes de professionnels envers la nouvelle culture d'entreprise. Dans le même contexte, Wieser (2004), a mené une étude de modélisation des trajectoires des patients au service des urgences de l'hôpital de Genève. Cette étude a mis en évidence une désynchronisation importante entre les flux physiques et les flux logiques, impliquant une sous-utilisation des ressources disponibles. En outre, elle a montré certaines limites en matière de saisie des données liées aux patients et aux ressources en temps réel. L'auteur a essayé, donc, de définir un nouveau tableau de bord et un système d'identification nommé RFID « *Radio Frequency Identification* ».

Le tableau 2.1, présente les trois objectifs qui ont été abordés dans le domaine hospitalier, en particulier, en radiothérapie. Il convient de remarquer que la plupart des travaux étudiés ont été élaborés en Amérique du nord. En bref, nous constatons, que la majorité des problèmes traités au niveau des services hospitaliers (El oualidi et al., (2010); Navas et al., (2004)) ont utilisé la modélisation et la simulation combinées afin de mesurer les temps d'attentes et évaluer par la suite, la performance de ces services.

Tableau 2.1: Principaux travaux étudiés dans la modélisation

Objectif	Travaux	Année
Modélisation des flux des patients afin d'élaborer des outils de simulation	Navas et al.	2004
	Belaidi et al.	2007
	El oualidi et al.	2010
Modélisation du parcours des patients afin de construire un tableau de bord	Wieser	2004
	Celia et al.	2016
Modélisation du parcours des patients dans l'objectif d'évaluer les modes d'organisation du travail	Wieser et al.	2004
	Baril et al.	2015
	Trudeau	2004

## 2.2 Simulation à évènements discrets

La simulation devient un outil de plus en plus utilisé dans les systèmes de santé. Il s'agit d'une technique qui permet aux parties prenantes de mener des expériences avec des modèles représentant des systèmes réels (Pidd, (2004)). Les avantages de cette approche proviennent de sa flexibilité, ainsi que de sa capacité à gérer la variabilité, l'incertitude et la complexité des systèmes dynamiques. La simulation est particulièrement utile lorsqu'un problème présente des incertitudes significatives nécessitant une analyse stochastique. Il est également un outil idéal pour les analyses «what-if» ayant comme but de prévoir le comportement d'un système dans des circonstances significativement différentes et de même comparer différentes stratégies de planification (Gillespie et al., (2014)). Dans la littérature, les méthodes de simulation (Brailsford et al., (2009) ; Sobolev et al., (2011)) sont classées principalement en quatre catégories : Monte Carlo, simulation à évènement discret, systèmes dynamiques et simulation à base d'agent. D'après Mielczarek (2012), il existe une forte dépendance entre la pertinence de la technique choisie et le problème étudié. En particulier, la simulation à évènement discret (SED) est l'une des méthodes les plus connues dans le domaine des soins de santé (Kneebone, (2004)). Les modèles d'évènements discrets simulent au fil du temps des processus et des objets appelés des entités dynamiques qui interagissent avec les ressources du système. Ces entités sont généralement équivalentes à des patients qui sont décrits par des attributs à savoir la priorité, la maladie, etc. Principalement, chaque patient se déplace

suivant une trajectoire, s'arrête, attend l'accès aux ressources et influence par la suite la prise en charge des autres patients. En outre, des distributions probabilistes sont utilisées pour caractériser les processus d'arrivée, les temps de service et d'autres facteurs aléatoires (Berg et al., (2009)).

### **2.2.1 SED en radiothérapie**

Concernant l'utilisation de la SED dans la santé, il existe plusieurs articles de revue (Fone et al., (2003) ; Katsaliaki et Mustafee, (2010) ). Un nombre important de ces articles ont discuté son application dans la santé en général (England and Roberts, (1978)) et d'autres dans les cliniques externes (Jun et al., (1999)). Dans le contexte de radiothérapie, la SED a été appliquée dans plusieurs problèmes. Dans la littérature, les études ont été regroupées en plusieurs classes en fonction des objectifs abordés dans les problèmes étudiés : modélisation des flux des patients, amélioration de l'efficacité et de la performance des processus et planification de la capacité des ressources, (Jun et al., (1999)).

- **Planification et allocation de la capacité des ressources**

Concernant la planification de la capacité des ressources, Thomas et al., (2001) ont utilisé la simulation avec le but d'évaluer le pourcentage de capacité à augmenter afin de maintenir un temps d'accès court aux soins. Dans cette étude, ils ont montré que le niveau de capacité à augmenter dépend directement du niveau de la demande et les temps d'attente autorisés et acceptés par les patients. Ils ont par la suite étudié le nombre d'accélérateurs linéaires nécessaires afin de minimiser les temps d'attente dans une clinique externe de radiothérapie (Thomas et al., (2003)). Dans le même contexte, Kapamara et al., (2007) ont élaboré un modèle de simulation à événements discrets. Ce modèle a été utilisé pour évaluer l'impact de quelques méthodes de planification des patients sur les accélérateurs linéaires en matière de nombre de plages horaires réservés. Dans chaque test, une période de «réchauffement» de 3 mois était utilisée et la planification des patients s'effectuait pendant une période d'une année au cours de laquelle les performances de planification sont enregistrées. Les tests ont, également, montré que des améliorations aux mesures de performance des heuristiques de planification peuvent être obtenues si le jour ouvrable du centre est prolongé d'une heure.

Plus récemment, Bikker et al., (2015), ont adopté une méthodologie constituée de deux parties : Ils ont développé un modèle linéaire en nombres entiers pour l'optimisation et la planification des

horaires des médecins. Ensuite, ils ont modélisé toutes les phases de radiothérapie tout en utilisant la SED afin d'évaluer la performance des horaires dans un environnement stochastique. Cet environnement est caractérisé par une incertitude sur les jours d'arrivée des patients et sur les absences des oncologues (vacances, conférences, etc.). Donc, il s'agit bien d'un modèle de simulation qui était utilisé dans une boucle en prenant les résultats obtenus de modèle d'optimisation comme étant des paramètres d'entrée et produisant d'autres mesures pouvant être ré-optimisées à chaque itération.

- **Amélioration de l'efficacité et de la performance des processus**

Au sujet de l'amélioration de l'efficacité et de la performance de processus de soins, la SED a été utilisée aussi pour localiser les goulots d'étranglements (Lucius et Brenner, (2010)). Des auteurs ont fondé leur étude sur la simulation d'une augmentation imprévue de la demande. En dehors de la radiothérapie, Hirshberg et al., (2001), a développé un modèle pour identifier les goulots potentiels dans les flux de victimes au sein d'une unité d'urgence suite à un scénario d'attentat terroriste. L'identification de ces postes a permis, par la suite, d'analyser et de déterminer le nombre des ressources chirurgicales requises afin d'aider et de prendre en charge les victimes le plutôt possible.

Une autre combinaison de la théorie des files d'attente et de la SED a été élaborée par Joustra et al., (2012), pour détecter les goulots d'étranglement dans le processus de radiothérapie et pour comparer quantitativement les différentes alternatives réduisant efficacement les temps d'accès. Grâce à la SED, l'interaction dynamique entre les différentes étapes du processus a été incorporée. Cela a permis de quantifier l'effet des fluctuations de la capacité sur le temps d'accès. Leur étude de cas a montré qu'une réduction de la variabilité de la capacité a paru plus rentable que d'ajouter plus de capacité en matière de performance.

- **Modélisation des flux des patients**

Les études de recherche suivantes présentent des travaux utilisant la SED dans la modélisation des flux et des trajectoires des patients. Werker et al., (2009), ont travaillé dans une unité de radiothérapie de « British Columbia Cancer Agency » pour modéliser une partie du processus de radiothérapie, qui est celle de la préparation du plan de traitement. Les limites de cette étude résident essentiellement dans la simplification du processus qui ne représentent pas de façon proche la réalité. Aussi pour « British Columbia Cancer Agency », Santibanez et al., (2009), ont développé

un modèle simulant les flux des patients lors de la consultation afin de tester les différentes politiques des rendez-vous. Ils ont constaté, par la suite, que l'utilisation de plusieurs stratégies de prise en charge, simultanément, offre des gains plus significatifs au niveau du temps d'attente. Aussi, nous citons l'étude faite par Proctor et al., (2007) dans le département de radiothérapie de « Walsgrave Hospital ». Ils ont utilisé Simul8 pour modéliser le processus depuis l'arrivée d'un patient jusqu'à la fin du traitement. Ils ont tenté d'évaluer l'effet de changement de plusieurs facteurs : la demande, les ressources et les politiques suivies sur les temps d'accès. Leurs observations affirment qu'un tel changement, dans les politiques et les règles, représente une alternative meilleure que l'ajout des ressources (Scanner ou machine de traitement). Ils ont montré par la suite qu'une prolongation dans les heures de traitement peuvent augmenter le nombre des patients traités, mais, pourra aussi engendrer des problèmes au niveau des exigences-matérielles et par la suite augmenter la probabilité qu'une machine tombe en panne.

Dans le même contexte, Beauchamp (2015), a modélisé les flux des patients recevant des traitements au CICL. Il a développé un modèle, implémenté sur Java, afin d'assurer une certaine flexibilité lors de lancement de certains scénarios. Ce modèle a permis de recommander plusieurs changements pourront améliorer la performance du centre de traitement (en terme de temps d'attente) à savoir la réservation d'une quantité de plages sur les machines de traitements pour les patients palliatifs urgents par exemple.

Le tableau 2.2 regroupe par catégorie les publications présentées dans cette partie. Ces catégories sont définies en fonction de différents types d'objectifs traités dans la littérature. En bref, la majorité des études citées ci-dessus ne traitent qu'une partie du processus complet. Notons que le problème de planification des patients serait présenté en détail dans la prochaine section.

Tableau 2.2: Publications sur des problématiques de simulation en radiothérapie

Objectif	Publications
Modélisation des processus	Proctor et al., (2007)
	Santibanez et al., (2009)
	Werker et al., (2009)
	Beauchamp, (2015)
	Wong et al., (2011)
Amélioration de l'efficacité et de la performance des processus	Lucius et Brenner, (2010)
	Joustra et al., (2006)
	Hirshberg et al., (2001)
Planification de la capacité et allocation des ressources	Thomas et al., (2001)
	Thomas et al., (2003)
	Kapamara et al., (2007)
	Bikker et al., (2015)

### 2.3 Organisation des rendez-vous en santé

Les systèmes de planification des rendez-vous sont utilisés dans les cliniques de soins primaires et spécialisés afin de gérer l'accès des patients aux différents services dans des délais courts. Ils visent à offrir des services et à assurer la satisfaction des patients tout en préservant une utilisation optimale des ressources utilisées (sans avoir recours aux heures supplémentaires). La performance d'un tel système de gestion des rendez-vous se mesure par rapport à deux critères ; temps d'attente directe et temps d'attente indirecte. L'attente indirecte est la durée en jours qui s'écoule entre la demande de consultation et la journée du rendez-vous affecté quant à l'attente directe est la durée en minutes durant laquelle le patient est dans la clinique sans rencontrer aucune ressource (Gupta et Denton, (2008)). Évidemment, un patient ayant un rendez-vous, est toujours sensé être confronté

à deux types d'attente. Cependant, pour les systèmes avec accès sans rendez-vous, les patients ne seront jamais confrontés à des temps d'attente indirecte tandis qu'ils vont subir des temps d'attente directe excessifs (Murray et Berwick, (2003)).

D'ailleurs, la bonne conception d'un système de gestion de rendez-vous assure une diminution dans les temps d'attente et permettra par la suite d'améliorer l'utilisation des ressources disponibles et d'augmenter la satisfaction des patients. D'après Huang (1994), la raison majeure qui impacte la satisfaction est les durées excessives en termes de temps d'attente (directe ou indirecte). Dans ce cadre, plusieurs études dans la recherche opérationnelle, ont été faites pour limiter ces deux facteurs. Il faut noter qu'à notre connaissance, il n'y aucune étude qui fasse référence à un modèle intégrant les deux types d'attentes.

### **2.3.1 Travaux de planification en radiothérapie**

En ce qui concerne les cliniques radio-oncologique, la gestion des rendez-vous est un processus complexe puisque chaque patient doit avoir plusieurs rendez-vous avec différents types de ressources dans un délai très limité durant les processus de prétraitement et de traitement. Le défi dans les centres de radiothérapie est, alors, de développer un système de rendez-vous des patients pour minimiser les temps d'attente de manière à atteindre les cibles de la grille, de minimiser les pourcentages des patients en retard et de maximiser l'utilisation des machines impliquées tout au long du processus complet (Petrovic et al., (2013)). En outre, différentes contraintes médicales et techniques doivent être prises en considération durant la planification, à savoir la priorité d'un patient, la disponibilité des oncologues, la disponibilité des machines de traitements, etc.

- **Processus de prétraitement :**

En ce qui concerne le processus de prétraitement, Petrovic et al., (2011), ont proposé une solution en appliquant d'autres méthodes. Un algorithme génétique était développé pour construire les horaires des patients durant la phase de prétraitement dont la fonction d'évaluation « fitness » prend en compte les cibles de temps d'attente des patients et le temps d'inactivité de chaque ressource matérielle. Toutefois, le modèle ne prend pas en considération les heures supplémentaires effectuées par les ressources humaines et ne fonctionne que si toutes les durées de traitements sont déterministes. Ainsi, certaines améliorations ont été envisagées en proposant un autre modèle d'optimisation multi-objectif (Petrovic et al., (2012)). Le modèle comporte trois algorithmes



génétiques qui traitent les catégories des patients différemment: un premier qui considère, également, toutes les catégories des patients, un deuxième qui priorise les patients urgents et un troisième qui fonctionne avec différents poids donnés aux catégories des patients. Les résultats montrent que le deuxième algorithme génétique a généré les horaires avec les meilleures performances.

- **Processus de traitement**

Les études suivantes présentent des approches d'optimisation utilisées pour résoudre les problèmes de planification des rendez-vous sur les accélérateurs linéaires, un processus très compliqué où les patients doivent recevoir de nombreuses séances de traitement. Conforti et al., (2008), ont présenté un modèle de programmation mathématique visant à minimiser le temps d'attente des patients en fonction de leur priorité. Cependant, tous les patients ne sont pas assurés d'obtenir tous leur rendez-vous pour leurs séances de traitement. C'est pourquoi, ils ont retravaillé le sujet tout en considérant un nouveau modèle mathématique dont l'objectif était de maximiser le nombre des patients planifié. Ils ont conclu que le modèle étendu avait de meilleures performances que le modèle de base : les résultats expérimentaux obtenus indiquent que 80% des patients avaient eu leurs rendez-vous (Conforti et al., (2010)). Dans les deux études faites, ils n'ont pas pris en considération la date à laquelle un patient est prêt pour commencer son traitement. Pour faire face à ces limites, un troisième modèle a été développé, ayant le même objectif que les deux derniers mais avec un objectif supplémentaire qui vise à minimiser le retard dans le début du traitement (Conforti et al., (2011)).

Petrovic et al., (2006), ont présenté deux algorithmes appelés « ASAS » et « JIT » pour établir un calendrier de traitement pour chaque patient référé. Dans les deux algorithmes, les patients sont classés par ordre de priorité en fonction de leur date d'échéance. Ensuite, l'algorithme ASAP attribue à chaque patient la plus proche date de début faisable pour la première fraction et les sessions suivantes sont réservées à partir de cette date. De la même façon, l'algorithme JIT planifie le calendrier de traitement mais juste en attribuant pour la première fraction, la dernière date de début possible. Ensuite, ils ont relancé le même problème (Petrovic et al., (2008)) et ils ont défini quatre paramètres à utiliser dans une méthode constructive qui cédule les patients un par un à partir d'une liste triée selon leur date d'échéance. Le premier paramètre considère la date à partir de laquelle le patient sera prêt pour planifier son traitement (généralement, la date à laquelle le patient

termine la phase de prétraitement) et la date d'échéance définie par la grille. Le second paramètre détermine les jours pendant lesquels un patient est considéré pour la planification de sessions quant au troisième, il évalue le nombre de jours après la date de fin de prétraitement pour commencer le traitement. Finalement, le quatrième paramètre détermine le niveau d'utilisation de chaque accélérateur linéaire. Chacun de ces derniers était testé individuellement et les valeurs des paramètres qui ont conduit à la meilleure performance étaient utilisées dans une méthode constructive de planification.

En partant de l'approche du processus de décision markovien (ADP), Sauré et al., (2012), ont développé un modèle qui cherche à optimiser les coûts associés au retard des patients. En effet, ils ont utilisé une architecture affine pour approximer la fonction objectif et résoudre un modèle de programmation linéaire équivalent. Donc, il s'agit d'une approche méthodologique qui a fourni un moyen systématique pour évaluer les politiques de planification à utiliser.

Plus récemment, Liu et al., (2017) ont proposé un modèle pour une gestion dynamique des rendez-vous. Ce modèle prend en compte la possibilité d'avoir des annulations et des absences avec des probabilités qui augmentent progressivement dès qu'un patient est en retard. Ils ont constaté que la politique d'accès libre, un paradigme d'ordonnancement populaire proposé récemment et appelé «répondre à la demande d'aujourd'hui», peut être un choix raisonnable même au sein d'un centre de radiothérapie lorsque la charge du patient est relativement faible en termes de nombre de traitement.

Dernièrement, nous constatons l'apparition des algorithmes « online », utilisés de plus en plus dans la construction des horaires en santé et qui visent à résoudre rapidement des problèmes dynamiques sans connaître les demandes futures. Legrain et al., (2014), ont développé une méthode hybride combinant l'optimisation stochastique et l'optimisation « online » pour mieux répondre aux besoins de planification. L'objectif était d'offrir aux patients un temps d'attente raisonnable pour leur premier traitement, tout en maximisant l'utilisation des ressources. Les patients curatifs possèdent des rendez-vous réguliers, c'est-à-dire, en même temps chaque jour de traitement, pour tenir compte de leurs autres engagements. Les patients en soins palliatifs possèdent des rendez-vous variables. Aussi, ils ont intégré l'incertitude liée à l'arrivée des patients et ont prédit des informations sur les futures arrivées pour fournir une description précise sur l'utilisation prévue des

ressources. La méthode a assuré des résultats à environ 210% de la solution optimale obtenue a posteriori basées sur des données réelles issues de « Centre Intégré de Cancérologie de Laval ».

Pérez et al., (2013), ont lancé une étude traitant la planification des patients dans la médecine nucléaire : une sous-spécialité de la radiologie qui implique plusieurs activités nécessitant des ressources différentes et multiples. Le problème était considéré comme dynamique et stochastique puisque les patients arrivent sur un court préavis et sont cédulés immédiatement, un par un. Donc, ils ont proposé deux modèles dont le premier est déterministe, tandis que le second est un modèle mathématique en nombre entier « online » en deux étapes. Par la suite, ils ont utilisé la simulation à évènements discrets pour évaluer les deux méthodes et ont démontré que le deuxième modèle donne de meilleurs résultats, en particulier pour les scénarios de charge élevée.

Le tableau 2.3 permet de comparer les publications spécifiques et pertinentes à notre problématique d'intérêt.

Tableau 2.3: Publications sur des problématiques de planification en radiothérapie

Publications	Contexte étudié	Objectif(s)
Petrovic et al., (2006)	Processus de traitement	Minimisation des retards pondérés de début de traitement.
Conforti et al., (2008)		Maximisation du nombre de nouveaux patients pris en charge.
Pérez et al., (2013)		Minimisation des heures supplémentaires
Conforti et al., (2010)		Minimisation des retards et maximisation du nombre des patients planifiés
Sauré et al., (2012)		Minimisation des coûts des retards de début du traitement
Petrovic et al., (2008)		Maximisation de l'utilisation des machines impliquées dans tout le processus
Legrain et al., (2014)		Maximisation de l'utilisation des ressources
Petrovic et al., (2011)	Processus de prétraitement	Minimisation des temps d'inactivité de chaque ressource
Petrovic et al., (2012)		

Brièvement, la majorité des contributions de la communauté de recherche opérationnelle, en radiothérapie, sont associées à la planification du traitement où le calendrier de chaque patient contient de nombreux traitements qui doivent être effectués sur plusieurs jours ou semaines. Concernant la phase de prétraitement ou le processus global, rarement où il existait des articles qui traitent la gestion des rendez-vous.

## **2.4 Synthèse bibliographique et problématiques couvertes**

Nous choisissons de placer la revue de littérature concernant la modélisation, la simulation et la planification en radiothérapie avant la présentation des objectifs afin de pouvoir positionner notre étude de manière à prendre en compte les résultats des études déjà présentés. En effet, lors de la sélection des articles apparaissant dans cette revue, nous avons cherché d'une part à étudier l'étendue de l'application de la modélisation et la simulation en radiothérapie et d'autre part, à investiguer les stratégies et les politiques de planification utilisées dans ces cliniques.

### **2.4.1 Limites de la littérature**

Par rapport à la problématique qui nous intéresse, cette recherche nous a conduits à cerner plusieurs limites qui semblent importantes à signaler :

- La majorité des études traitent principalement la phase de traitement en radiothérapie ;
- La majorité des études supposent que la phase de prétraitement est à durée fixe ;
- La majorité des études supposent que toutes les séances de traitement ont la même durée (Généralement, la première séance est plus longue) ;
- L'absence de prise en compte des ressources humaines critiques à savoir les technologues ;
- Peu d'études qui traitent le caractère dynamique et stochastique du processus et des aléas de traitement ;
- Peu d'informations sur la distribution des paramètres choisis pour les caractéristiques des traitements des patients (i.e., nombre et durée des séances) ;
- L'absence de prise en compte des meilleures pratiques hospitalières qui prévoient de maximiser les chances de rémission pour les patients en radiothérapie.

## **2.4.2 Problématique de modélisation et de simulation de la trajectoire des patients en radiothérapie**

Suite à l'analyse de la revue de la littérature ainsi que le portrait de la radio-oncologie au Québec, nous pouvons conclure que l'objectif principal était d'augmenter la proportion des patients traités dans les délais fixés par la grille de classification. Confronté aux exigences qu'il doit satisfaire, un centre radio-oncologique souffre de problèmes majeurs de dysfonctionnement. Les sources majeures de ces problèmes résident principalement dans la trajectoire complète qui nécessite le plus souvent une collaboration entre plusieurs ressources humaines (oncologues, technologues, etc.) et matérielles (salles de traitement, accélérateurs linéaires, équipements d'imagerie, etc.). Également, cette trajectoire présente une complexité particulière en terme de planification des patients qui doivent être traités dans les délais et d'organisation des ressources qui ne sont pas disponibles en permanence. De ce fait, le centre radio-oncologique devrait assurer de disposer des ressources disponibles au bon moment pour les patients en question afin de pouvoir les traiter dans les délais prescrits par la grille. Pour résumer, un grand nombre de particularités distinguent les centres radio-oncologiques des autres systèmes hospitaliers. Notons que ce sont les principales particularités qui ont été citées dans la littérature et dans les centres radio-oncologiques (CHUM/CICL) :

- La prise en charge du patient implique l'intervention d'un grand nombre de ressources humaines et matérielles très variées ;
- La coordination entre les différentes ressources au sein d'un même centre est primordiale afin d'assurer la prise en charge du patient selon sa priorité et sa pathologie ;
- Le pilotage du système complet est important afin de pouvoir réagir rapidement aux patients urgents et aux différents aléas possibles notamment les retards et les absences ;
- Le parcours d'un patient ou sa trajectoire dépend de sa priorité ainsi que le type du cancer ;
- Certaines tâches sont séquentielles pour tous les patients à savoir la première consultation, d'autres peuvent être négligées pour les patients urgents afin de pouvoir les traiter le plutôt possible.

Face à ses particularités, les institutions doivent se convertir vers des nouvelles stratégies de gestion et de planification qui assurent d'une part la maîtrise des délais et d'autre part l'utilisation optimale des ressources disponibles tout en fournissant un niveau haut de soins aux patients. Désormais,

pour survivre dans un environnement de plus en plus concurrentiel caractérisé par une limitation des ressources, les centres doivent repenser leur performance et donc imaginer et simuler les scénarios afin d'y adapter des stratégies et des politiques appropriées. Donc, il existe un avantage potentiel à modéliser et simuler le processus complet pour tester l'impact de plusieurs alternatives et politiques de gestion de rendez-vous, d'allocation des ressources, de gestion des files d'attente, etc. Autrement, élaborer un modèle ou un outil d'aide à la décision permettant de simuler et de tester plusieurs politiques. En radiothérapie, la question a été examinée dans les anciens travaux mais seulement quelques travaux qui ont étudié le flux complet (depuis l'arrivée d'un nouveau référé jusqu'à la sortie) ou qui ont abordé l'aspect générique d'un modèle de simulation. Ainsi, la plupart des études existantes reposent principalement sur une modélisation spécifique au problème étudié : il s'agit de l'approche généralement adoptée dans la littérature. Donc, le modèle générique dédié aux plusieurs centres radio-oncologiques n'existe pas encore même si les problèmes sont pratiquement similaires, d'un organisme à un autre, et portent essentiellement sur l'organisation de la trajectoire des patients.

De ce fait, nous prenons le parti de débiter nos investigations sur la possibilité de développer un modèle de simulation générique. Autrement dit, serait-il possible de développer un modèle de simulation générique modélisant la trajectoire complète des patients en radiothérapie ?

#### ❖ Objectifs spécifiques

L'objectif est de développer un modèle de simulation générique pour plusieurs centres radio-oncologiques :

- Modéliser plusieurs alternatives de flux des patients ;
- Intégrer et tester plusieurs règles de gestion des listes d'attente ainsi que les politiques de planification tout au long du processus complet ;
- Tester et analyser des scénarios « What-if » ;
- Automatiser le choix des dates des rendez-vous tout au long du processus complet de radiothérapie.

#### ❖ Originalité du projet

Au meilleur de nos connaissances, il n'existe que peu de projets qui traitent l'aspect générique d'un modèle simulant le flux complet des patients en radiothérapie. Comme nous l'avons

mentionné, la majorité des contributions de la communauté de recherche opérationnelle en radiothérapie sont associées à la planification et l'organisation des rendez-vous sur des accélérateurs linéaires, en tenant pour acquis une durée de préparation fixe. Cependant, cette hypothèse surestime souvent la capacité des centres et peut causer de graves problèmes lorsque le système proposé ne parvient pas à répondre aux attentes de la grille. Le but de notre étude est de fournir aux gestionnaires des recommandations et des informations quantitatives fiables des options envisagées sur la performance du système visée. A la lumière de ce constat, nous allons présenter, dans ce projet de recherche, une étude qui offre trois applications majeures :

- Une analyse des flux des patients, pour le département de radio-oncologie en question, permettant de cibler avec précision le goulot dans le processus;
- Une analyse sur les différentes règles de gestion des listes d'attentes;
- Un ajustement de la stratégie de gestion des rendez-vous pour les palliatifs ainsi que les curatifs.

Donc, il s'agit de développer un outil d'aide à la décision visant à améliorer le service apporté au patient, tout en optimisant l'utilisation des ressources humaines et matérielles dans l'objectif de réduire les temps d'attente des patients.

## CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE ET CHOIX DES OUTILS

Dans cette section, nous proposons une étude comparative permettant de choisir la méthode de modélisation, ainsi que l'outil de la simulation, les plus adaptés à notre problématique. Dans la première partie, nous détaillons la méthodologie proposée dans le développement de notre simulateur. Ensuite, nous présentons, alors, les différents outils existants.

### 3.1 Méthodologie de conduite d'une simulation

La simulation est couramment utilisée comme étant un outil d'aide à la décision dans le domaine de la santé et sa mise en œuvre suppose de franchir un certain nombre d'étapes. Selon Ricordel et Deamzou (2000), il existe cinq étapes:

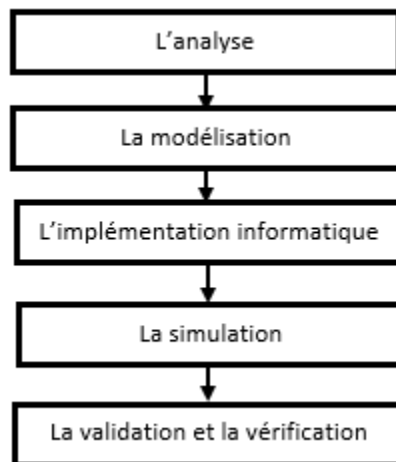


Figure 3.1: Les étapes du processus de simulation (Ricordel et Deamzou (2000))

Pour plus de détails :

- L'analyse : Elle correspond au processus de description du type de problème.
- La modélisation : Elle correspond au processus de définition d'une représentation structurée des systèmes à simuler.
- L'implémentation informatique : Elle correspond au processus de construction d'une solution fonctionnelle du problème. En pratique, cela consiste à coder la solution avec des langages particuliers de programmation.



- La simulation : Elle correspond à la phase d'utilisation du modèle implémenté pour des problèmes concrets. Notons que la simulation découle immédiatement de la phase de modélisation.
- La vérification et la validation : Elle correspond à la phase d'application des méthodes pour juger la précision d'un modèle à faire des prévisions pertinentes.

Ces étapes présentent, alors, un guide méthodologique permettant la modélisation et la simulation d'une unité radio-oncologique afin de répondre à notre problématique. De ce fait, nous proposons de suivre cette dernière démarche.

Finalement, suite à l'application de cette méthodologie, différents scénarios « What-if » vont être effectués afin de proposer des recommandations génériques pour l'ensemble des départements en radio-oncologie. Une fois la méthodologie est connue, nous commençons par choisir les outils adéquats pour la mise en place de cette méthodologie.

## **3.2 Choix des outils de la modélisation et de la simulation**

L'objectif de ce travail est l'implémentation d'un modèle de simulation dédié aux plusieurs centres radio-oncologiques. Une fois l'objectif est fixé, il faut réaliser un certain nombre de choix quant aux méthodes de modélisation et simulation. Nous justifions ces choix dans cette section.

### **3.2.1 Justification d'utilisation de la méthode de modélisation**

Pour Abt, (2010), une approche de modélisation se caractérise par :

- Une démarche structurée qui englobe les étapes et les acteurs employés dans l'élaboration des modèles ;
- Un cadre de modélisation qui définit les limites de système et qui gère la complexité des modèles ;
- Un ensemble de modèles obtenus à partir de langages de modélisation qui sont issus de différentes communautés scientifiques.

En examinant quelques études présentées dans la littérature, nous notons de nombreuses méthodes de modélisation dédiées à l'origine aux entreprises ou aux industriels et qui ont été appliquées dans le milieu hospitalier. Elles se distinguent par le système faisant l'objet de modélisation, la vue prise en compte dans la modélisation et l'objectif du projet de la modélisation elle-même.

### ❖ Les méthodes de modélisation

Les principales méthodes de modélisation vont être détaillées dans cette section. Il faut noter que nous nous limitons aux trois méthodes; SADT, GRAI et BMPN. Chacune représente l'une des approches présentées par Trilling et al., (2006) et qui ont été déjà utilisées fréquemment dans les systèmes hospitaliers.

#### ✓ SADT (Structured Analysis and Design Technics)

La méthode SADT, connue aussi sous le nom IDEF0 « *Integration Definition for Function Modeling* », offre une analyse fonctionnelle des activités d'un système complexe. L'avantage de cette méthode de modélisation, c'est le fait qu'elle permet d'offrir un formalisme graphique universel utilisé comme un outil de communication dont la syntaxe est simple, claire, précise et cohérente. Les conflits liés aux ambiguïtés et aux confusions d'interprétation, sont alors atténués grâce à une structure hiérarchisée par niveau. Par contre, Il faut noter que les flux ne peuvent pas être différenciés en fonction de leurs types.

Bien évidemment, l'application de la méthode SADT dans un milieu hospitalier présente autant des atouts que des limites nécessitant une prise en considération :

- Le manque de différenciation entre les activités du patient et celles des ressources (intervenants hospitaliers et ressources matérielles);
- Le manque d'enchaînement et d'ordre des activités dans la représentation du modèle SADT ;
- Le manque d'informations dynamiques sur chaque activité (expressions booléennes, durée opératoire...).

Les limites citées ci-dessus, font en sorte que le modèle proposé ne peut pas être utilisé et intégré directement dans la simulation.

#### ✓ GRAI (Graphes et Réseaux d'Activités Inter-reliés)

GRAI est une méthodologie développée par le laboratoire « Grai » de l'université de Bordeaux en France (Doumeingts et al., (2000)). C'est une méthode orientée système de décision ayant pour objectif la modélisation de la réalité d'un système de gestion de production, à savoir le sous-système décisionnel et informationnel. L'inconvénient avec cette méthode qu'elle se focalise essentiellement sur la partie décisionnelle et non pas sur les flux des patients ainsi que leurs interactions au sein de l'organisme hospitalier. Ceci fait en sorte que le modèle développé en

appliquant cette méthode ne pourra pas être utilisée directement dans la simulation des trajectoires des patients.

### ✓ **BPMN (*Business Process Model and Notation*)**

BPMN est un langage orienté spécialement conçu pour la modélisation des processus d'affaires au sein des entreprises industrielles. BPMN fournit une notation graphique destinée à la modélisation de processus en tant que « *workflow* » et il assure aux entreprises la capacité de comprendre leurs procédures internes dans une notation graphique standard. Dernièrement, il a reçu une acceptation dans le milieu hospitalier grâce au fait qu'il ait été conçu pour être utilisé et compris par tous les types de ressources humaines sans avoir besoin d'avoir des connaissances techniques spéciales. Dans la littérature, il existe de nombreuses références concernant l'adoption de BPMN dans les soins de santé pour diverse applications : les unités d'urgence, les cliniques externes, les unités chirurgicales, etc. (Rojo et al., (2008)). Nous citons l'exemple de Strasser et al., (2009), qui ont décrit un nouveau système de gestion des processus pour reconstruire le processus de prise en charge tout en utilisant le langage BPMN pour la modélisation. L'objectif principal de cette étude était d'aider les gestionnaires à détecter les écarts entre les processus cliniques définis et réels ainsi qu'à identifier les causes principales. Le BPMN a été, également, employé dans les centres radio-oncologiques (Noumeir et al., (2006)). Dans cette étude, une description détaillée de chaque tâche a été effectuée et des rapports prédéfinis ont été créés, conduisant ainsi à une amélioration de l'efficacité de prise en charge.

### ❖ **Méthode choisie**

Dans ce contexte, la méthode BPMN serait adoptée comme étant une norme de référence normalisée spécialement conçu pour la modélisation des processus d'affaires et leurs gestions. Étant donné la diversité et la complexité des processus en radiothérapie, l'importance du BPMN réside dans sa capacité de capter et modéliser tous les détails pertinents concernant des processus spécifiques tels que les trajectoires des patients au sein du centre ainsi que leurs interactions avec les ressources humaines et matérielles, tout en assurant un modèle simple et compréhensible par toutes les parties prenantes du secteur de la santé. Le BPMN n'est pas un langage de simulation mais l'avantage est qu'il est destiné à être implémenté et traduit sous forme d'un modèle de simulation.

De plus, la deuxième caractéristique de BPMN, qui nous amène à l'adopter, est le fait que cette technique de modélisation simplifie et facilite la mise en œuvre et l'implémentation du modèle. Le BPMN permet de construire des diagrammes de processus (BPD – « *Business Process Diagrams* ») représentant des graphes ou des réseaux constitués d'objets exposés par les activités de processus, reliés par des flux de contrôle, qui définissent la relation logique, les dépendances et l'ordre d'exécution des activités. L'utilisation de la norme BPMN peut également définir un flux spécifique pour le processus étudié et son développement ultérieur, y compris les trajectoires des patients, la gestion des ressources et la définition des acteurs impliqués.

### 3.2.2 Justification d'utilisation de la méthode de simulation

Pour développer notre modèle de simulation, il faudrait choisir entre un langage de programmation et les outils de simulation tels qu'Arena qui sont mieux adaptés à la simulation à événements discrets. Les travaux qui ont mené une étude de simulation, ont eu recours à utiliser les outils et les plateformes de simulation disponibles tels que SIMUL8 , Arena , etc. La figure ci-dessous montre une tendance à l'utilisation d'Arena dans la simulation à événements discrets (Almagooshi, (2015)).

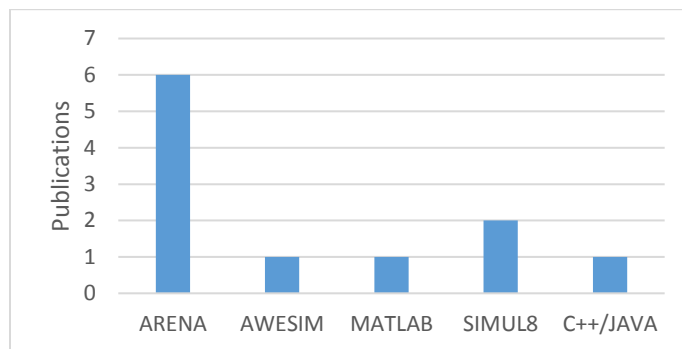


Figure 3.2: Les plateformes utilisées en SED (Almagooshi, 2015)

Pour plus de détails, il paraît indispensable d'identifier les avantages et les inconvénients de chacun de ces outils dans le tableau suivant.

Tableau 3.1: Comparaison entre les langages de programmation et les outils de simulation

	Langages de programmation	Outils de simulation
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assurer la flexibilité nécessaire au modèle de simulation</li> <li>• Aucune contrainte sur les interactions et la modélisation des flux et des ressources : tous les modules sont développés</li> <li>• Permettre de réutiliser les objets</li> <li>• Possibilité de combiner le modèle avec des modules d'optimisation développés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assurer la création d'un modèle dans des délais courts</li> <li>• Les entités et les ressources sont déjà modélisées</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processus de construction complexe : développer tous les modules prend beaucoup de temps</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulté de combiner le modèle de simulation à plusieurs modèles d'optimisation</li> </ul>

Comme nous voulons assurer l'aspect générique pour notre simulateur et permettre à d'autres chercheurs de le réutiliser et d'intégrer des modèles d'optimisation, nous optons pour l'utilisation du langage de programmation JAVA. Le choix de JAVA est basé essentiellement sur le fait qu'il existe une excellente bibliothèque de simulation stochastique « SSJ », développée à l'Université de Montréal.

## CHAPITRE 4 MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE DE SIMULATION GÉNÉRIQUE

Le travail présenté dans cette partie concerne la mise en œuvre d'un outil de simulation au sein des centres radio-oncologiques. En lien avec l'objet de notre projet de maîtrise, le travail effectué au CICL ainsi qu'au CHUM nous a permis de nous confronter à la réalité de différents centres fonctionnels. Notons que le but est d'élaborer une cartographie standardisée présentant tous les flux possibles pour un nouveau patient référé. Pour cela, nous allons avoir recours aux études faites, dans ce contexte, afin d'inclure quelques aspects spécifiques dans le simulateur et d'assurer, par la suite, son aspect générique. Ensuite, nous détaillons et décrivons le principe de fonctionnement de notre simulateur ainsi que ses entrées et ses sorties.

### 4.1 Étude, collecte des données et modélisation du flux des patients

Afin d'avoir une étude fiable, nous commençons par collecter les données et identifier les flux des patients ainsi que leurs interactions avec les ressources humaines et matérielles. Nous avons directement collaboré avec le CICL et le CHUM mais avons aussi inclus plusieurs centres radio-oncologiques traités dans la revue de littérature.

#### 4.1.1 Flux des patients au CICL/CHUM

Les départements du CICL et CHUM offre un traitement de radiothérapie. Cette technique utilise des accélérateurs linéaires pour émettre des rayonnements d'électrons dans le but d'éliminer les cellules cancéreuses. D'après la figure 4.1, le processus débute par une attribution d'un rendez-vous de consultation à un nouveau patient référé.

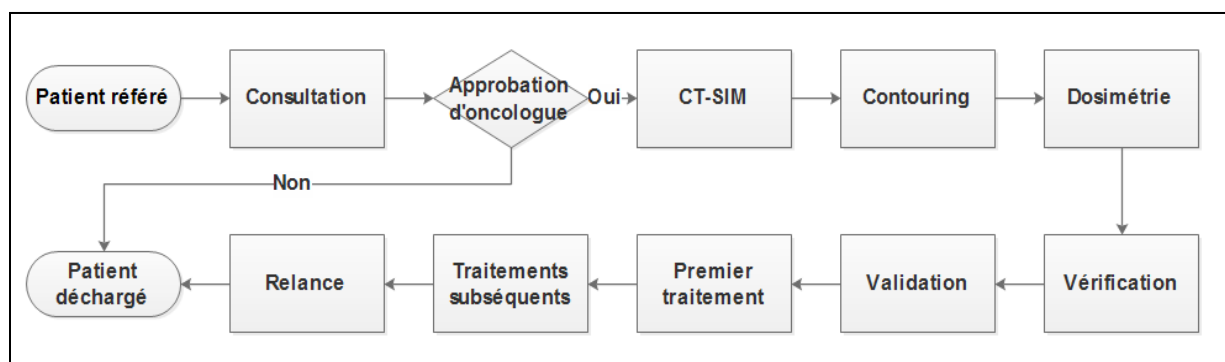


Figure 4.1: Les opérations de prise en charge d'un patient en radiothérapie

En effet, une consultation est prévue avec un médecin spécialisé dans le type de tumeur du patient. A cette étape, seulement le type du cancer et sa priorité sont connus. Avant que le traitement puisse commencer, plusieurs étapes de préparation doivent être effectuées.

Une fois la consultation est faite, la prochaine étape serait un rendez-vous pour le scanner avec un technologue, utilisé pour un examen d'imagerie lors duquel des images détaillées à trois dimensions du site de la tumeur seront créés. Au cours de cette phase, un examen de simulation est fait pour calibrer l'accélérateur linéaire par rapport à la position du cancer à traiter, de façon à minimiser l'impact des rayonnements sur les tissus sains. Dans le cas où un moule est nécessaire pour le positionnement du patient durant le traitement, une séance de moulage est programmée le même jour que CT-SIM.

À la fin du scanner, le calendrier des traitements est fourni au patient tout en tenant compte de sa priorité. Ce calendrier indique les jours et la période de la journée où le patient reçoit un traitement. Le patient sera, alors, en mode d'attente de son premier traitement. Entre temps, un médecin fait le contour de la tumeur. Le contour est généralement effectué par le médecin à qui le patient était affecté lors de sa première consultation. Ce contour sert de base au plan de traitement qui est une description détaillée de la dose de rayonnement et des angles des faisceaux de rayonnement. Le plan de traitement est effectué par l'unité de dosimétrie. Ce processus est complexe dans la mesure où il nécessite plusieurs validations. Dépendamment de la complexité du cancer ainsi que son type, le dosimétriste élabore un plan de traitement faisant l'objet d'une phase de vérification effectuée par un autre collègue, suivi d'une phase de validation par l'oncologue auquel le patient était affecté lors de sa première consultation.

Une fois que la phase de prétraitement est finie, suivant un calendrier établi auparavant, les traitements seront exécutés sur un accélérateur linéaire sur des jours consécutifs, à l'exception des week-ends. Seulement, les patients urgents P1 peuvent être traités durant le weekend en cas de besoin. Le nombre de séances varie, généralement, entre cinq et quarante-quatre, selon la taille, le type du cancer et l'état du patient. Au cours des traitements, le médecin rencontre régulièrement le patient pour une consultation de suivi. Après le dernier traitement, le patient sera déchargé.

### 4.1.2 Flux des patients présentés dans quelques études de recherche

Comme nous l'avons expliqué dans la partie précédente, un processus de radiothérapie commence toujours avec l'assignation d'un rendez-vous de consultation avec un oncologue donné. Ce processus s'étend essentiellement sur trois phases, soient, la consultation, le prétraitement et le traitement.

Il faut noter que le but ultime de cette partie est d'élaborer une cartographie standardisée, présentant les différentes phases et par la suite tous les flux possibles pour un nouveau patient référé. Ainsi, il paraît indispensable de bien analyser le fonctionnement du processus, les ressources impliquées et les patients traités. Pour cela, nous avons eu recours aux études faites en radiothérapie afin d'inclure quelques modalités spécifiques dans le modèle de simulation et d'assurer par la suite son aspect générique. En particulier, nous présentons seulement les études où nous avons noté des différences par rapport à la trajectoire modélisée au CHUM et au CICL.

#### ❖ Les consultations supplémentaires :

Bikker et al., (2015), ont réalisé une étude dans le centre médical académique d'Amsterdam (AMC) pour réduire les temps d'accès. Pour cela, ils ont présenté le processus de traitement et les différentes contraintes temporelles entre les différentes phases. Ce processus est présenté dans la figure 4.2.

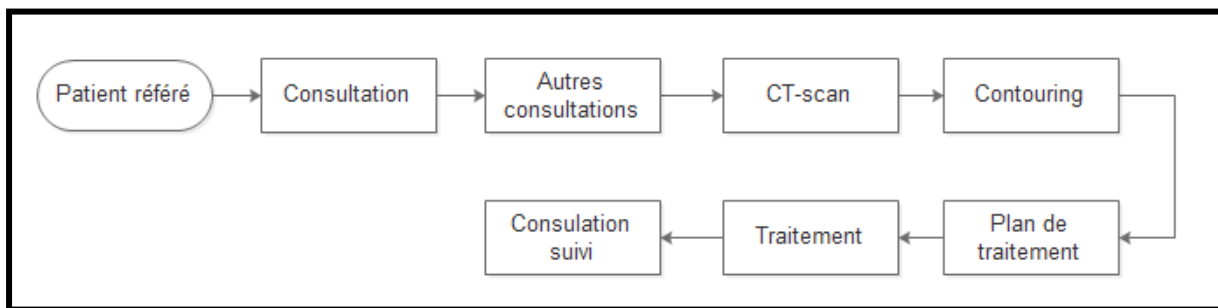


Figure 4.2: Processus de soins en radiothérapie-AMC

Dans ce cas, certains patients ont besoin d'autres consultations supplémentaires au processus de soins standard. Par exemple, des appareils spécifiques sont implémentés dans le corps des patients prostatiques et digestifs pour faire la vérification de la position des organes pertinents sur le scanner. Une fois implémenté, le corps doit se rétablir pendant plusieurs jours avant qu'un CT-SIM précis puisse être fait. Pour certains types des patients, il est nécessaire de faire différents scans ou



visualisations en plus ou à la place de la tomодensitométrie: un PET-CT scan, 4D-CT scan ou cystoscopie. En outre, des dispositifs supplémentaires peuvent être moulés avant que le traitement ne puisse commencer.

#### ❖ **Les patients CHART:**

Edmund et al., (2007), ont réalisé une étude dans « *Nottingham University Hospitals NHS, UK* » sur un problème de planification des traitements. Certes, ils n'ont pas trop détaillé le flux, mais, ils ont présenté des particularités qui interviennent de façon directe dans le changement de la trajectoire d'un patient. En effet, ils ont intégré les patients CHART « *Continuous Hyper-fractionated Accelerated Radiotherapy Treatment* » qui exigent 3 sessions de traitement par jour sur 12 jours consécutifs et la présence du médecin traitant dans la première séance de traitement avec le technologue.

#### ❖ **La vérification par un physicien :**

Werker et al., (2009), ont reporté leur étude à l'agence « *British Columbia Cancer Agency* »(BCCA) pour étudier le processus de préparation de plan de traitement. Pour créer un plan pour un seul patient, les étapes de base sont les mêmes à l'exception de la vérification qui se fait par un physicien et non pas un dosimétriste.

### **4.1.3 Politique de gestion des rendez-vous**

Dans un département de radio-oncologie, certains délais d'attente sont dus à la disponibilité des équipements, soit CT-Scan ou accélérateur linéaire et à la disponibilité des ressources humaines. Cette attente découle de la stratégie d'équité optée pour distribuer les rendez-vous aux patients tout au long du processus complet de radiothérapie.

Généralement, un patient obtient 3 rendez-vous :

#### ➤ **Rendez-vous Consultation :**

En ce qui concerne le système de prise de rendez-vous de consultation, il existe trois modes qui déterminent le moment de la prise de décision (Gupta et Denton, 2008):

- Le processus par lot « *The Single Batch Process* »: la gestion des rendez-vous se fait à la fin de chaque session. Autrement, une fois que les demandes sont observées et accumulées (principalement dans les blocks opératoires);

- Le processus ouvert « *The Unit Process* »: à chaque fois qu'une demande de rendez-vous arrive, un rendez-vous est affecté;
- Le processus périodique « *The Periodic Process* »: la gestion des rendez-vous se fait de façon périodique. Autrement dit, il faut attendre la fin de période pour attribuer les rendez-vous (la période est généralement un jour ou une demi-journée en radiothérapie).

Au CHUM et au CICL, le mode utilisé est le processus ouvert pour les patients urgents P1 et le processus périodique pour le reste de catégories. En outre, l'attribution d'un rendez-vous de consultation se fait généralement en suivant les critères suivants

---

**Algorithme 1:** Affectation rendez-vous consultation

---

Résultat : Rendez-vous de consultation

```

1 tant que Rendez-vous est vide faire
2   pour Chaque oncologue dans le centre faire
3     Vérifier les critères suivants:
4     - Les compétences: S'il peut traiter le type du cancer du patient concerné;
5     - Les quotas: S'il peut accepter d'autres patients;
6     - L'équité: Si l'ajout de cette consultation ne va pas impacter l'équité en terme de nombre des patients;
7     - La disponibilité: S'il exerce une activité de consultation;
8     Si tout est vérifié: Tableau [oncologues admissibles] ← oncologue;
9   fin
10  fin
11  pour Chacune oncologue admissible faire
12    Choisir soit le premier oncologue disponible, soit, le dernier oncologue disponible;
13    // Dépendamment de la règle de planification choisie;
14  fin
15 fin

```

---

Ainsi, le patient serait affecté au premier ou au dernier oncologue disponible tout en respectant le quota (ayant une plage horaire de consultation dans son calendrier) et ayant les compétences nécessaires pour lui traiter. Une fois le patient est assigné à un médecin, ce dernier est le seul autorisé à réaliser les autres tâches en lien avec ce patient. Pour cela, un attribut du patient, identifiant le médecin responsable, serait présenté dans le modèle de simulation.

➤ **Rendez-vous CT-SIM:**

Au CICL, ce rendez-vous est fixé dès que la consultation du patient est terminée pour tous les patients qui continueront leurs traitements. D'après une étude basée sur les données de l'hôpital « Notre Dame » en 2009, environ 30% des patients n'entreront pas dans le processus de radiothérapie et se verront attribués à d'autres traitements. Ce rendez-vous se traduit par une réservation d'une plage sur le premier ou le deuxième scanner. En effet, celui-ci serait attribué lorsqu'une plage horaire disponible pour le scanner, est trouvée et qui coïncide obligatoirement avec une activité de planification chez l'oncologue traitant. L'assignation d'une plage est différente selon la priorité du patient.

Pour chaque patient curatif P3 ou P4, l'attribution d'un rendez-vous de CT-SIM avec un oncologue se fait en exécutant les étapes suivantes.

---

**Algorithme 2:** Affectation rendez-vous CT-SIM pour les patients curatifs

---

Résultat : Rendez-vous CT-SIM

```

1 tant que Rendez-vous est vide faire
2   Rechercher la prochaine plage de planification du médecin;
3   si Le scanner 1 est disponible dans ce créneau alors
4     rendez-vous = créneau;
5   sinon
6     Recommencer les étapes précédentes jusqu'à ce que le Rendez-vous soit fixé;
7   fin
8 fin

```

---

Pour un patient palliatif, les étapes seront similaires, à l'exception de la machine utilisée. Ainsi, si deux plages des deux machines sont disponibles à la même période, le scanner 2 est priorisé, étant donné que le patient curatif peut seulement utiliser le scanner 1. Donc, la logique de rendez-vous implantée cherche à distribuer la première plage disponible en respectant les conditions énoncées précédemment. Notons que le fait de placer des rendez-vous seulement durant la plage planification génère des délais d'attente supérieurs aux délais établis par la grille.

➤ **Rendez-vous Dosimétrie:**

Le système gère cette étape (et celles autres qui suivront) en utilisant des rendez-vous sur dossier. Autrement dit, les rendez-vous ne sont pas établis en avance, mais choisis au fur et à mesure qu'une

ressource se libère pour le traitement d'un dossier ajouté à la file d'attente. Bien évidemment, les dossiers seront traités selon une règle de priorité et par la suite les patients ne seront plus traités par l'ordre d'arrivée. Dans cette phase, les activités consistent au calcul de dose par un dosimétriste, à la vérification par un collègue et à la validation par le médecin traitant. Pour éviter l'accumulation de dossiers, les dosimétristes réalisent en priorité les corrections de traitement et les validations pour leurs collègues avant de traiter un nouveau dossier. Généralement, les dossiers vont être priorités en fonction de la disponibilité des médecins ayant un bloc de « plan de traitement ».

Une probabilité d'erreur est assignée selon le type de cancer et le type de dosimétrie utilisés. Comme le montre la figure suivante, un échec après la vérification par un collègue conduit, à un réajustement du traitement par le dosimétriste avant la vérification du médecin. Par contre, s'il y a un échec après la vérification du médecin, le dosimétriste recommence à nouveau, le calcul de traitement qui doit être validé encore une autre fois par un collègue et par le médecin traitant. Il faut noter qu'une fois le calcul est approuvé par le médecin, le traitement n'est plus rejeté.

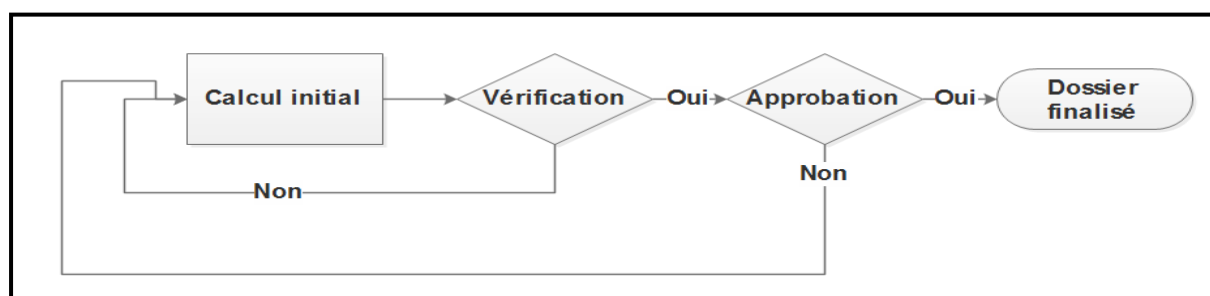


Figure 4.3: Les activités du plan de traitement

#### ➤ Rendez-vous Traitements :

Le département du CICL possède 4 accélérateurs linéaires dont chacun a une capacité de 30 plages par jour dont chacune est égale à 20 minutes. Un rendez-vous de patient se traduit par une réservation d'une de ces plages pendant le traitement du patient. Cette étape est cruciale étant donné qu'il faut trouver une plage horaire disponible sur l'une des machines permettant de traiter le patient pendant le bon nombre de jours consécutifs tout en respectant les délais fixés par la grille de classification.

Pour faciliter la recherche d'un premier rendez-vous, l'idée est de réduire le nombre de plages à parcourir en utilisant une logique de recherche qui explore seulement les plages d'un intervalle limité par une date de libération et une date d'échéance. La date de libération est définie par la date

où le patient a fini son CT-SIM. La date d'échéance quant à elle est définie par le délai fixé par la grille de classification. Voici les étapes exécutées pour cédule N rendez-vous pour les patients curatifs.

---

**Algorithme 3:** Planification de traitement

---

**Résultat :** Calendrier de traitement

```

1 tant que Calendrier est incomplet faire
2   pour Chacun des accélérateurs linéaires faire
3     Premiers-traitements = Rechercher date-début ( Date CT-SIM, Date d'échéance, Blocs-Traitement );
4   fin
5   si Plusieurs disponibilités sont trouvées alors
6     Les comparer par rapport à la date de début;
7     Mettre en mémoire la disponibilité la plus proche et la machine de traitement;
8     Planifier les  $N - 1$  séances de traitement pour les  $N - 1$  jours ouvrables consécutifs sur cet accélérateur à la
      même plage;
9     si Une plage est déjà affectée à un autre patient alors
10      Chercher une autre machine disponible à cette plage;
11      si Une machine est disponible alors
12        Planifier cette plage sur cette machine;
13      sinon
14        Chercher une disponibilité sur l'un des accélérateurs dans la même journée;
15      fin
16    sinon
17      Sortir;
18    fin
19  sinon
20    Autoriser la recherche après la date d'échéance et relancer les étapes précédentes jusqu'à ce que un calendrier
      soit prêt ;
21  fin
22 fin

```

---

Pour les patients palliatifs, un peu de flexibilité est accordée vu que nous autorisons la recherche dans les blocs réservés aux traitements de ces derniers et dans les weekends pour les urgents. Autrement,

- Premiers traitements = Rechercher date début (Date CT-SIM, Date d'échéance, Blocks Traitement, Blocks Réservés)

Le calendrier de traitement est communiqué au patient après le scanner. Cependant, à ce stade, les dates se caractérisent par une incertitude élevée vu que le plan de traitement n'a pas été encore fait. En effet, le calendrier pourrait être respecté dans le cas où le plan de traitement sera validé avant

un jour du début prévu de traitement. Donc, un retard, dans ce dernier, implique un ajustement dans le début de traitement. L'ajustement se fait par la suppression du premier rendez-vous qui serait rajouté sur le même accélérateur et à la même plage après le dernier traitement prévu.

#### **4.1.4 Définition de la cartographie standard**

La standardisation peut être définie comme étant un processus de réingénierie qui vise à obtenir le même comportement d'un processus donné dans tous les cas. Idéalement, si tous les processus avaient le même comportement, il serait également très facile d'appliquer un système de gestion intégré pour eux. Cependant, si un processus contient beaucoup d'exceptions, il serait beaucoup plus compliqué de soutenir cette définition et sa gestion. C'est le cas de la normalisation au niveau hospitalier. Compte tenu de la particularité de notre cas, la définition d'un processus précis et complet prend encore plus d'importance. Notre but de base est d'élaborer une cartographie standard pour les centres radio-oncologiques à travers des observations sur le terrain (CHUM et CICL) et des différentes études entamées dans ce contexte.

En bref, le processus que nous cherchons à modéliser contient différentes étapes qui se suivent toujours dans le même ordre, bien que certaines soient facultatives dépendamment de la priorité et du type du cancer d'un patient référé, ce type de processus est appelé « flow-shop ». En occurrence, ce « flow-shop » est même considéré comme hybride car certaines étapes, la dosimétrie ainsi que le traitement par exemple, peuvent être effectuées sur plusieurs machines identiques et interchangeables. De plus, lors de certaines étapes, la machine à utiliser ainsi que ses paramètres seront spécifiques à chaque patient, une contrainte importante à souligner en planification du plan de traitement. Enfin, le patient devrait revenir plusieurs fois de suite sur la même machine, cette dernière caractéristique étant appelée recirculation (ou faisant partie d'un processus réentrant).

Certes, il existe des étapes qui sont conditionnées par la complexité du dossier du patient à savoir la dosimétrie. Mais, il est important de souligner que les processus de prise en charge des patients d'une même catégorie présentent un ensemble de caractéristiques communes. Nous détaillons ci-dessous les caractéristiques fondamentales du processus de traitement en radiothérapie afin de mettre en évidence une vision standard pour tous les centres radio-oncologiques:

- En radiothérapie conventionnelle, chaque salle de traitement dispose de son propre accélérateur linéaire ;

- Le processus de traitement comporte de nombreuses séances successives, jusqu'à plusieurs dizaines, ces séances devant avoir lieu, soit sur le même accélérateur linéaire soit sur plusieurs ayant des caractéristiques différentes dépendamment de la technique diffusée. Autrement, il s'agit d'une importante répétition d'une même tâche sur plusieurs jours successifs ;
- Pour chaque patient un protocole de traitement est défini par le médecin à la fin de la consultation. Ce protocole, qui est adapté à chaque patient en fonction de la localisation précise de la tumeur et de sa priorité, définit le nombre de fractions et la technique à utiliser durant le processus de traitement ;
- Le processus implique une collaboration entre les ressources humaines et matérielles dans la réalisation du traitement. D'un centre à l'autre, nous constatons que ces ressources sont similaires et qu'elles ne diffèrent que par le nombre et la capacité.

Pour conclure, nous retrouvons de nombreuses similitudes entre les différents centres radio-oncologiques et nous constatons, aussi, que les flux des patients d'une même catégorie sont la plupart du temps similaires. Ils ne diffèrent que par des détails tels que la nature et le nombre de ressources matérielles et humaines disponibles ou les heures d'ouvertures des cliniques spéciales. Ces conclusions nous permettent de construire un flux conceptuel des patients comme le montre la figure 4.4.

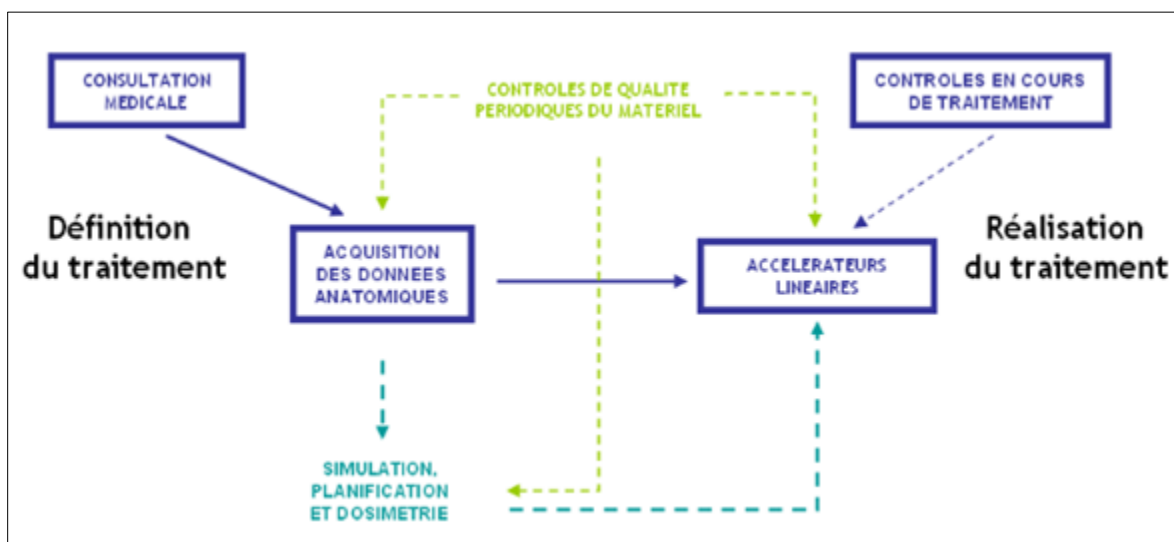


Figure 4.4: Schéma simplifié du processus en radiothérapie

### **Légende du schéma :**

- Bleu foncé: trajectoire du patient (avec les flèches bleu foncé)
- Bleu clair: tâches « transparentes » ou sur dossier, réalisées par l'oncologue et les technologues pour préparer le plan de traitement
- Vert clair: contrôles de qualité périodiques réalisés sur tous les appareils impliqués dans la planification et la réalisation du traitement.

Notons que les flux liés à la gestion de la qualité et des pannes, ne sont pas intégrés dans le modèle de simulation. Finalement, BPMN nous permet d'élaborer une définition détaillée d'une cartographie de la trajectoire des patients présentée dans l'Annexe A et l'Annexe B.

## **4.2 Implémentation informatique**

Après la définition de l'ensemble du processus et la détermination de chaque tâche, nous allons concentrer notre intérêt sur l'implémentation informatique. Un modèle de simulation pour les cliniques radio-oncologiques serait créé. Il représenterait les flux des patients ainsi que leurs interactions avec les ressources humaines et matérielles disponibles telles que les médecins, les infirmières, les technologues, etc.

### **4.2.1 Hypothèses**

Comme le montre le tableau 4.1, nous avons, également, eu recours aux hypothèses suivantes afin de pouvoir modéliser le processus. La nature de ce problème exige des hypothèses de modélisation bien adaptées et qui peuvent aider à répondre, d'une façon fiable, aux questions concernant l'allocation des ressources et la planification des rendez-vous. Dans ce cadre, certaines hypothèses utilisées, auront un faible impact sur le modèle vis-à-vis, le temps d'accès, le nombre des patients traités en retard et le taux d'utilisation des ressources. D'autres hypothèses sont critiques et sans elles, il serait impossible de créer un modèle de simulation valide.



Tableau 4. 1: Hypothèses et impact sur la précision du modèle

Hypothèses	Réalité	Modèle	Impact
Chaque patient est affecté à un jour de libération et un délai d'attente. Le jour de la libération se réfère à la date à partir de laquelle le patient serait disponible pour le traitement. Le délai d'attente dépend de la priorité comme indiqué dans la grille de classification	Oui	Oui	Élevé
Tous les patients P1 sont directement pris en charge	Oui	Oui	Élevé
Les patients curatifs ne sont traités que du lundi au vendredi, tandis que les patients palliatifs et urgents sont traités du lundi au samedi	Oui	Oui	Élevé
Les ressources ayant un faible impact sur le processus sont modélisées comme étant de postes équivalents temps plein. Ces ressources sont les infirmières et les technologues	Non	Oui	Moyen
Chaque ressource ne peut traiter qu'une seule opération à la fois	Oui	Oui	Faible
Toutes les ressources, sauf les médecins, sont disponibles durant les heures d'ouverture, du lundi au vendredi. Les médecins sont disponibles selon leurs propres calendriers.	Oui	Oui	Faible
Pour les patients palliatifs, les machines peuvent fonctionner en temps supplémentaires	Oui	Oui	Élevé
Un patient est considéré en retard s'il se présente au centre après son heure de rendez-vous prévu et avant la fermeture de la clinique.	Oui	Oui	Moyen
Un patient est considéré traité s'il a fini ses traitements et il a quitté le centre	Oui	Oui	Faible

## 4.2.2 Description du modèle de simulation

Généralement, un modèle de simulation à événements discrets comporte 3 classes principales d'objets qui sont les entités, les ressources et les files d'attente. Ainsi, une entité attend dans la file d'attente jusqu'à ce que la ressource se libère et soit disponible. De plus, notre modèle de simulation comporte deux autres parties : la modélisation des étapes que les patients traversent selon la trajectoire et la modélisation des tâches pour les ressources humaines. Autrement, il englobe le flux des patients de l'arrivée à la sortie ainsi que leurs interactions avec les différentes ressources. Il intègre également, les aléas et la variabilité qui sont présents à toutes les étapes du processus, y compris les arrivées des patients, la durée de consultation et de chaque tâche.

Les paragraphes qui suivent présentent une description détaillée de notre modèle de simulation. Ce modèle pourrait être utilisé pour plusieurs centres radio-oncologiques, moyennant quelques changements dans les entrées à savoir le nombre de ressources disponibles, les durées des opérations, etc.

### a) Création et modélisation des entrées

Pour créer un modèle de simulation, un certain nombre d'entrées sont nécessaires.

#### ❖ Le patient :

En admettant que l'objectif principal de notre étude est d'optimiser les temps d'attentes dans la plupart des unités de soins, il faut commencer par modéliser la principale entrée qui est le patient. Dans notre modèle, le patient est une entité. Principalement, un patient entre dans le système par instantiation, c'est-à-dire, une nouvelle instance de l'objet « Patient » est créée. La création de ces entités peut se produire à intervalles fixes ou en fonction de la distribution de probabilité. Pour les caractériser, un ensemble d'attributs est utilisé. Chaque attribut est une caractéristique propre à chaque patient et sa détermination est basée sur les dossiers-patients et sur les statistiques réalisées à partir d'informations collectées. Ses attributs sont affectés en fonction des pourcentages d'occurrence par rapport à chaque centre radio-oncologique.

Une fois que les attributs sont connus, le patient serait affecté à un médecin par rapport à la règle d'affectation utilisée. Après la rencontre avec le médecin, plusieurs trajectoires sont possibles. Certains patients seront admis sur les unités de soins et d'autres seront renvoyés et référés à d'autres

types de traitements. Comme la montre la figure ci-dessous, les patients qui sont acceptés, vont être placés dans une file d'attente, servis conformément à la politique de priorisation définie par les gestionnaires et à la trajectoire à laquelle ils sont affectés.

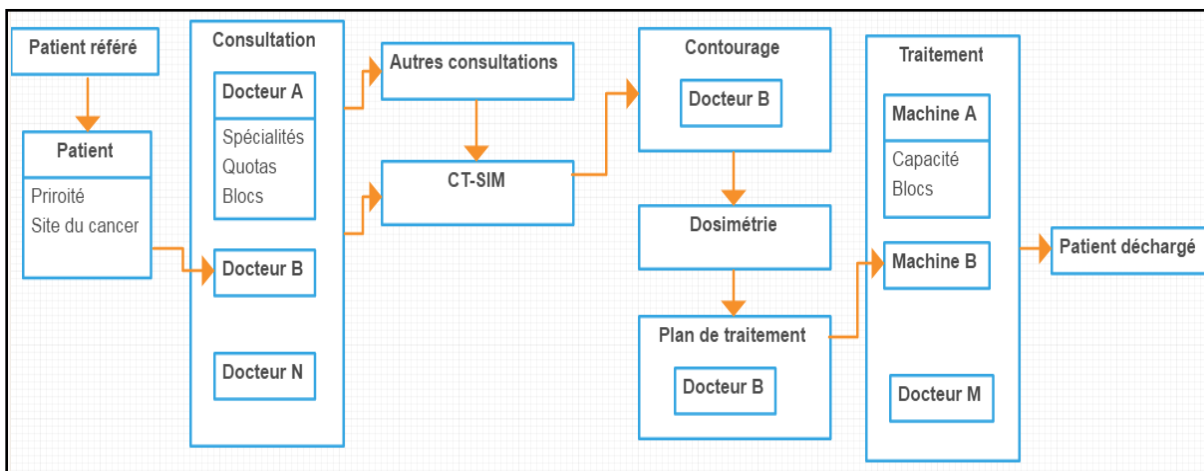


Figure 4.5: Modèle conceptuel de la trajectoire du patient dans le simulateur

#### ❖ Les trajectoires :

Si chaque ensemble des patients suivait le même chemin et la même trajectoire à travers un système, impliquant les mêmes tâches dans le même ordre, ce système serait facile à modéliser. Toutefois, ce n'est pas le cas. La trajectoire que les patients suivent dans notre modèle n'est pas nécessairement connue a priori. Elle peut être influencée par un déclenchement des événements ou des changements dans le système causés par des aléas tels que les retards, les absences, etc. Plus précisément, chacune des différentes trajectoires est attribuée par des distributions stochastiques ou des valeurs de probabilité fixes.

Dans notre modèle, nous utilisons des données historiques du CICL pour modéliser la probabilité de ces trajets alternatifs, qui dépendent principalement de la priorité, du type du cancer et de décision prise par l'oncologue lors de la première consultation. Dans la figure 4.6, nous présentons la trajectoire des patients référés lors de la phase de consultation.

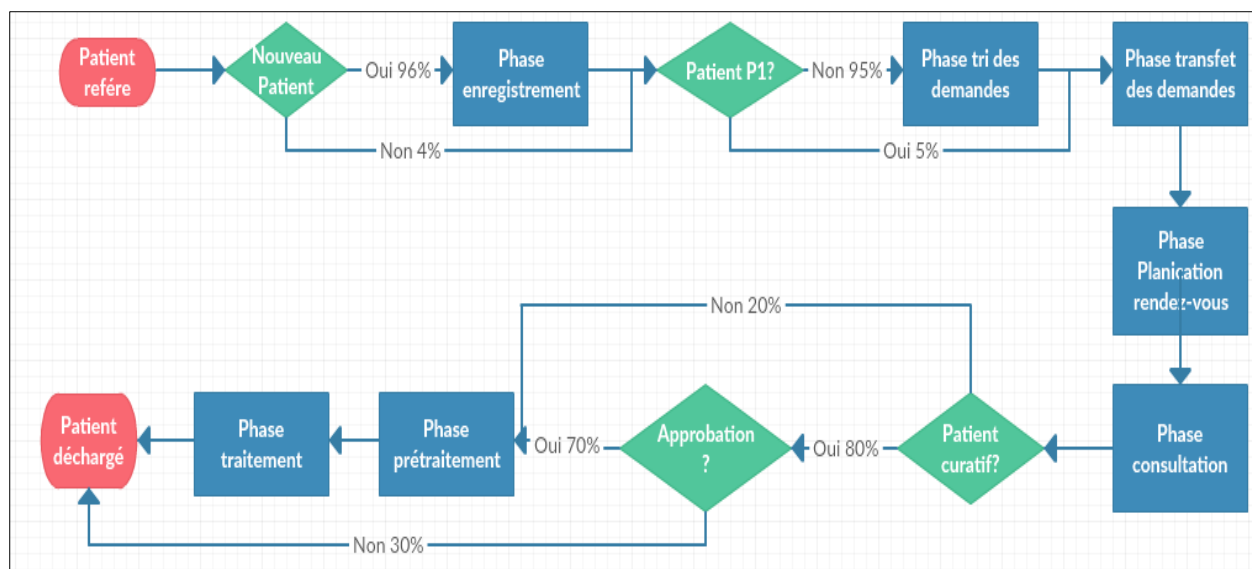


Figure 4.6: Modèle de la trajectoire d'affectation d'un rendez-vous consultation

#### ❖ La modélisation des ressources et des activités du personnel :

Après leur arrivée, les patients vont être acheminés vers les ressources appropriées sur la base de trajectoire affectée. Tout en exécutant le modèle, les patients vont interagir avec plusieurs ressources à différents moments pour des durées variables. Sur le plan réel, Il est possible qu'un patient puisse occuper plus d'une ressource en même temps. Prenons l'exemple d'un patient entrant dans une salle de traitement, il occupe la machine de traitement et saisit également l'attention des technologues présents et qui assurent le bon déroulement de la séance.

Dans le modèle, certaines ressources sont explicitement modélisées dans tout le processus et d'autres ne le sont pas. En effet, une ressource n'a été incluse que si elle contribue au retard du patient. De cette façon, le modèle est maintenu aussi simple que possible. Les ressources humaines incluses dans le modèle sont : les oncologues, les technologues, les dosimétristes et les infirmières. Tout comme les patients, les ressources peuvent être attribuées à des caractéristiques individuelles à savoir le temps nécessaire pour compléter une opération, la disponibilité qu'elle possède durant une journée de travail, etc.

#### ❖ La gestion de disponibilité des ressources :

Pour gérer le fait que les ressources ne sont pas disponibles en permanence dans le temps, chaque ressource est représentée différemment, dans une tentative d'obtenir des détails adéquats pour chacun. En effet, nous choisissons de modéliser les postes ayant un impact sur le processus de soins

comme étant des ressources avec des calendriers et les ressources ayant peu d'impact comme étant des postes équivalent temps plein.

- **Disponibilité des oncologues :**

Les oncologues ont de nombreuses responsabilités et activités de sorte qu'il est assez difficile de représenter leur disponibilité. Afin de limiter cette complexité, nous choisissons de modéliser la disponibilité des docteurs sous forme des calendriers. En effet, chaque oncologue possède son propre calendrier partagé sous forme des blocs horaires. Ces blocs sont caractérisés par un type d'activité, une date de début et une date de fin. Les types d'activités sont les suivantes : « Consultation », « Contour », « Planification » et « Relance ». Suivant ces blocs, notre modèle les rend simplement disponibles pendant ces intervalles de temps seulement pour effectuer les tâches.

Au CICL, la journée de travail pour les oncologues est séparée en deux périodes dont la première représente l'avant midi et l'autre l'après-midi. Cependant, plusieurs centres comme le CHUM, ont plus que deux 2 types de périodes par jour. Dans ce contexte, nous décidons de donner plus de flexibilité aux oncologues tout en leur permettant d'avoir plus que deux blocs de durée variable par jours. En effet, l'utilisation des blocs d'une durée variable nous permet de modéliser les oncologues avec leurs vrais calendriers et de créer un modèle de simulation valide.

- **Disponibilité des technologues et des dosimétristes :**

Les technologues et les dosimétristes sont modélisés différemment. Leur disponibilité est modélisée comme un poste équivalent temps plein. Cette simplification peut ne pas être tout à fait exacte, car il y a des brèves périodes (comme le déjeuner) pendant lesquelles aucun technologue n'est disponible; Cependant, les exigences des technologues dans le modèle sont petites et les retards potentiels causés par ces ressources sont mineures. Comme werker et al., (2009), nous modélisons ces ressources à temps plein et il suffit de spécifier seulement le nombre des ressources disponibles.

- **Disponibilité des infirmières :**

En radiothérapie, les infirmières et les agents administratifs ont un faible impact et interviennent rarement dans le processus de prise en charge. En particulier, ils interviennent, principalement, dans la phase d'accueil des patients arrivés. C'est pourquoi, nous les modélisons comme étant une seule ressource à temps plein.

### ❖ La gestion des calendriers:

La disponibilité des oncologues ainsi que celle des ressources matérielles est modélisée avec des calendriers qui sont caractérisés par des semaines, des jours et des blocs. L'attribut blocs est défini par un type, un début, une fin et une liste d'activités à faire. La figure ci-dessous présente le package « Scheduling » implémenté dans le modèle pour la gestion des calendriers.

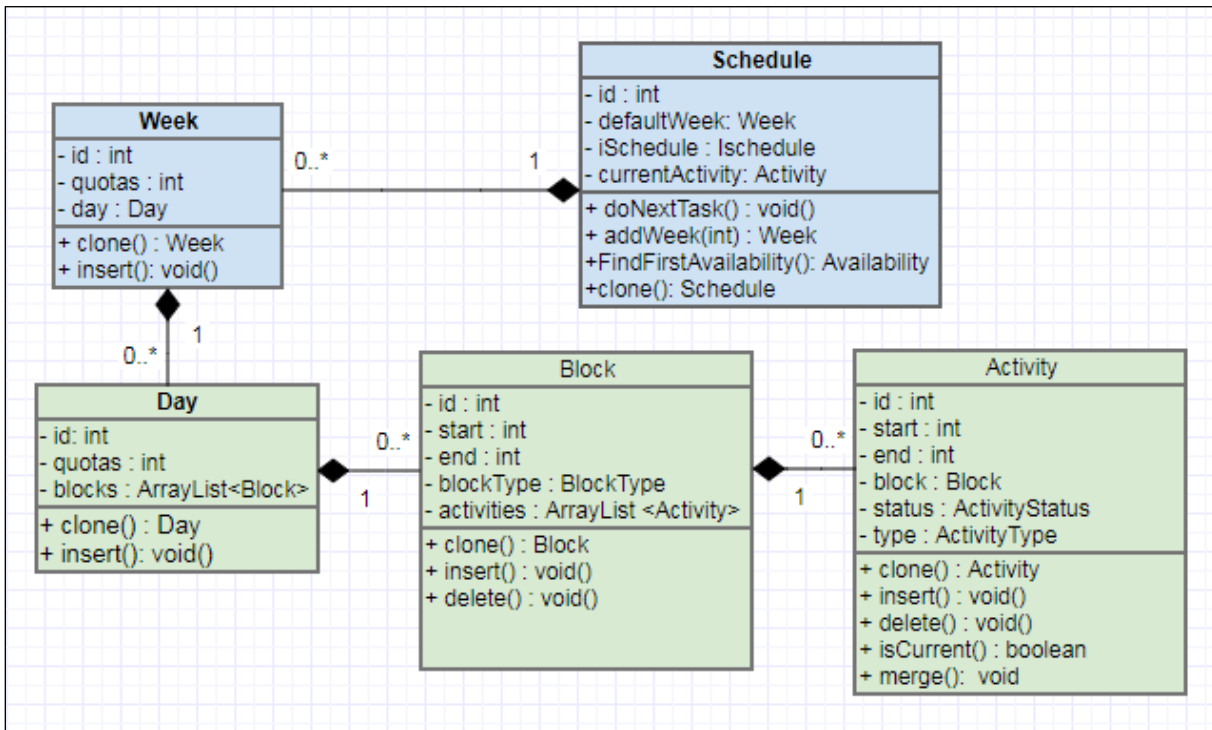


Figure 4.7: Package « *scheduling* » dans le simulateur

### ❖ L'allocation des durées opératoires:

Afin de finir l'implémentation des ressources, les différentes tâches impliquées ainsi que leurs durées doivent être modélisées. Le tableau 4.2 définit en détail la distribution affectée à chaque tâche à partir des données historiques disponibles au CICL. Malheureusement, ces données ne pouvaient pas être utilisées pour établir les durées opératoires de la dosimétrie. Pour leurs tâches, nous avons eu recours à des hypothèses qui se basent essentiellement sur les durées définies dans d'autres travaux de recherche en radiothérapie.

Tableau 4.1: Temps d'exécution de chaque tâche définie

Tâche	Ressources	Type de distribution	Paramètres de distribution	Disponibilité
Consultation	Oncologue	Déterministe	60 min	Selon le calendrier des médecins
Moulage	Technologue	Déterministe	15 min	Les heures d'ouverture
CT-SIM	Technologue/ Scanner	Déterministe	45 min	La disponibilité des scanners
Contour	Oncologue	Uniforme	30-120 min	Selon le calendrier des médecins
Calcul dosimétrie	Dosimétriste	Uniforme	30-120 min	La disponibilité des dosimétristes
Vérification		Uniforme	15-45 min	
Réalisation Plan de traitement	Oncologue	Uniforme	20-120 min	Selon le calendrier des médecins
Premier traitement	Technologue/ Scanner	Déterministe	45 min	La disponibilité des accélérateurs linéaires
Traitements	Technologue/ Scanner	Déterministe	20 min	

#### ❖ La gestion des évènements :

Dans un modèle de simulation, les évènements font progresser le système. Pour comprendre le système en cours, il existe plusieurs mécanismes asynchrones de déclenchement d'évènements. En effet, notre modèle de simulation à évènements discrets doit satisfaire les deux conditions suivantes :

- L'état ou le statut d'une activité est décrit par des grandeurs discrètes « Done » ou « TODO ».
- L'évolution du système est conditionnée par l'occurrence d'évènements à « certains instants », tels que le référencement d'un patient, l'ouverture du centre, etc. Ainsi, les transitions d'état

d'une activité donnée apparaissent seulement suite à des évènements qui se produisent en des instants précis.

En bref, chaque évènement est associé à une activité qui est caractérisée par un ensemble d'attributs : un statut ou un état, un type, un début, une fin et un évènement. Généralement, le modèle a été conçu de telle sorte qu'au début d'une journée, chaque ressource doit suivre le même principe de fonctionnement. Ce fonctionnement est détaillé dans la figure 4.8.

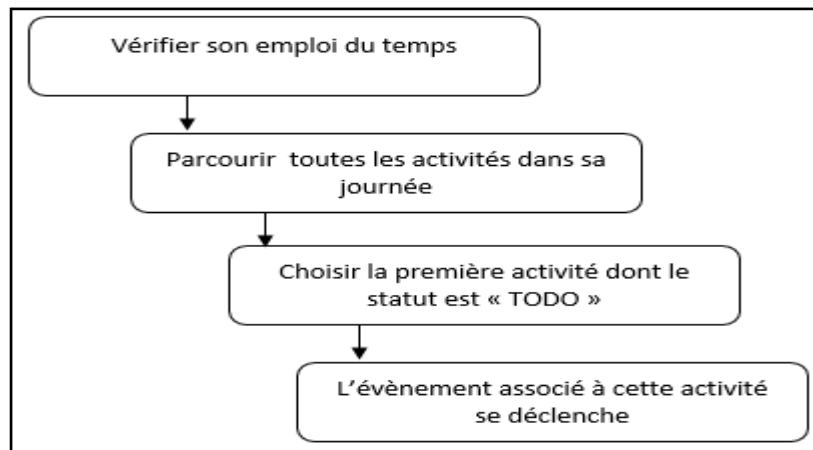


Figure 4.8: Principe de fonctionnement

Pour répondre aux besoins du modèle, chaque évènement est associé à une classe qui hérite de la classe « ActivityEvent » qui elle-même, implémente l'interface « Event » développée dans la bibliothèque « SSJ ». La figure 4.9 montre les diagrammes de classes du package « Event » implémenté dans le modèle de simulation.



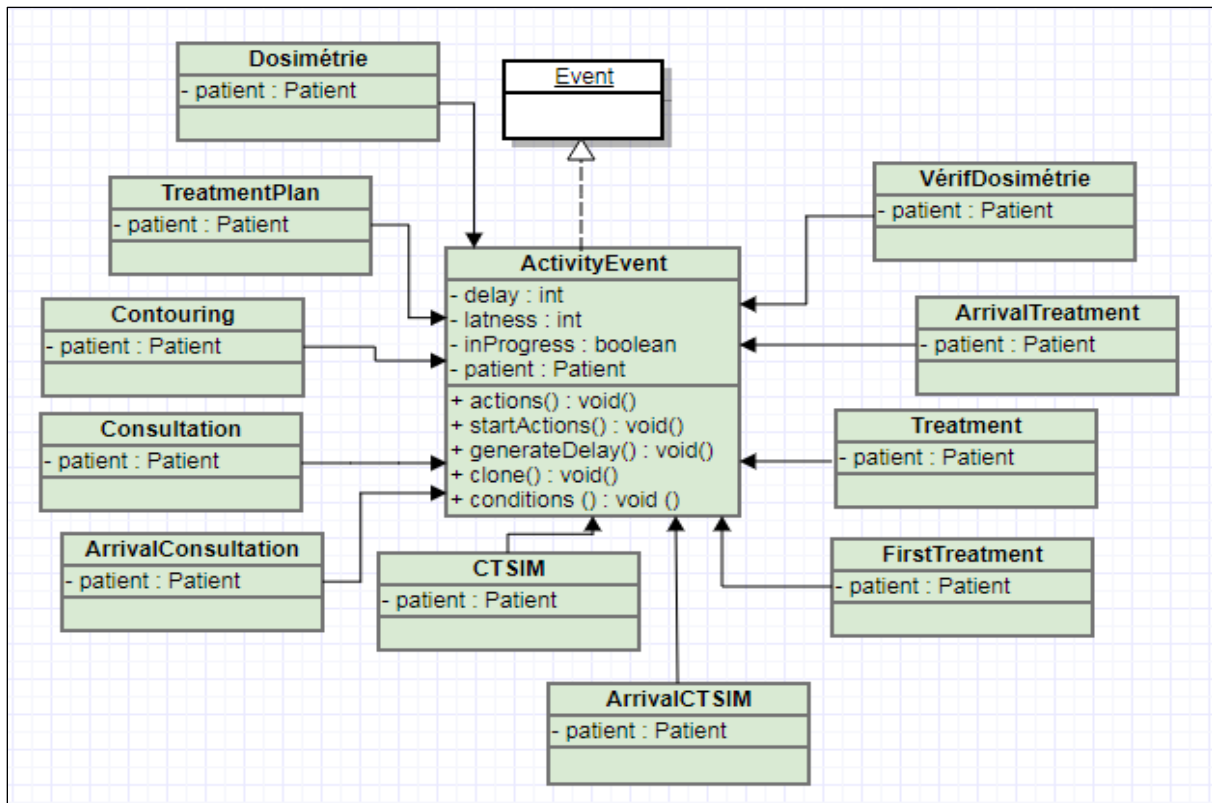


Figure 4.9: Package d'événements

Notons que tous les temps n'ont pas été discrétisés afin d'améliorer la précision de notre simulateur. Par exemple, à la place de passer en revue tous les blocs de cinq ou dix minutes pour vérifier si un changement d'état s'est manifesté, une action de changement est ajoutée directement dans une liste une fois qu'un événement se déclenche. Ainsi, nous pouvons réduire et limiter les sauts et assurer une vision complète de l'état de la clinique tout au long de la journée.

#### b) Données de sortie du simulateur

Généralement, un modèle génère le type de sortie pour lequel il est conçu. Les mesures de résultat définissent en grande partie le type de modèle le plus approprié à utiliser et la manière dont le modèle doit être structuré. Cette étape consiste alors à choisir des mesures significatives pour notre problème. Dans ce cas, le modèle renvoie les indicateurs suivants :

- Temps d'accès : temps pendant lequel le patient est en attente pour un premier traitement
- Les délais entre les différents rendez-vous
- Le taux d'utilisation des ressources : ratio entre le temps occupé et le temps total
- Le pourcentage des patients traités en retard

- Les rendez-vous donnés au patient tout au long du processus de prise en charge

### c) Politiques de gestion des listes d'attente

La file d'attente est l'endroit où les patients attendent pour un service particulier. En radiothérapie, les patients passent à travers différentes files d'attentes pour rencontrer le médecin et les spécialistes. Pour toutes les phases, leur position dans les files est calculée en fonction d'une règle de gestion appelée discipline de file d'attente et établie par les gestionnaires de la clinique. Au CICL, les patients curatifs sont pris en charge au cours de chaque phase en appliquant la règle « Premier arrivé, Premier servi » quant aux palliatifs, ils sont traités selon la règle «EDD» et triés par la suite selon leur date d'échéance.

L'objectif de notre modèle est d'assurer l'aspect générique et standardisé afin de pouvoir simuler plusieurs centres. L'idée est de modéliser les règles de priorisation les plus utilisées dans l'industrie, afin de pouvoir estimer et comparer les conséquences des décisions prises vis-à-vis des indicateurs de performance. L'un des avantages de « SSJ » est qu'il offre une interface nommée « Comparator » permettant de comparer les patients par rapport à plusieurs critères définis. Dans ce cas, nous pouvons implémenter plusieurs règles de priorisation héritant de cette interface. Les règles implémentées sont présentées dans le tableau 4.3.

Tableau 4.2: Règles de priorité implémentées dans le simulateur

Règle de priorité	Principe
PEPS	Les patients sont traités selon leurs dates d'arrivée
EDD	Les patients sont traités selon leurs délais de traitements
Priorité	Les patients sont traités selon leurs priorités

### d) Planification de rendez-vous sous l'effet des retards et des absences

En radiothérapie, les patients arrivent aux cliniques en fonction de l'heure rendez-vous. Cependant, il existe une minorité des patients qui ne sont pas ponctuels ; soit en retard ou soient absents. Le niveau actuel de non-ponctualité par un patient ne doit pas empêcher de le prendre en charge et d'affecter un rendez-vous sur l'accélérateur. Par conséquent, les cliniques ont besoin d'un système

de rendez-vous flexible qui est capable de protéger la performance de clinique des fluctuations quotidiennes pouvant conduire aux déficiences de la performance (le temps d'inactivité des ressources, la congestion, etc.).

Nous proposons une politique dynamique pour la planification des rendez-vous des patients en tenant compte du fait que les patients peuvent être en retard ou tout simplement absent.

- **Génération des retards et des absences**

Dans plusieurs études, les patients urgents sont souvent modélisés de manière à arriver toujours à l'heure pour prendre leur rendez-vous (White et al. 1964). Dans le cas extrême, notre étude suppose que tous les patients urgents P1 sont ponctuels. Notons qu'un patient est considéré en retard s'il se présente au centre après l'heure de rendez-vous prévu mais avant la fermeture de la clinique.

Pour la génération des retards et des absences, nous avons choisi d'attribuer des valeurs de pourcentages fixes qui changent d'un centre à l'autre afin de s'approcher de la réalité de chaque centre radio-oncologique. Par exemple, au CICL le système va générer un pourcentage de retards ainsi que d'absences parmi tous les patients qui sont en cours de traitement, à l'exception des patients urgents P1. Autrement, nous aurons 5% des patients dont l'attribut « late » est vrai et d'autre 3% dont l'attribut « missing » est vrai.

- **Gestion des retards et des absences**

Finalement, pour gérer l'arrivée d'un patient, nous avons créé une classe « ArrivalTreatment » héritant de l'interface de SSJ « Event ». Cet événement est appelé au moment où un rendez-vous est planifié à cet instant pour vérifier l'attribut « isPresent » du patient. Dans le cas où, le patient n'est pas encore présent, le système procède de cette façon.

---

**Algorithme 4:** Gestion des retards
 

---

**Résultat :** Un autre rendez-vous pour le traitement

```

1 si Le patient est arrivé avant la fin de la journée alors
2   L'attribut «isPresent» = Vrai;
3   Chercher une plage disponible sur l'un des accélérateurs la même journée;
4   si Une plage disponible est trouvée alors
5     nouveau rendez-vous = plage disponible;
6   sinon
7     Planifier à la fin de la journée un rendez-vous sur la machine de traitement à laquelle il est affecté durant son
      traitement;
8   fin
9 sinon
10  L'attribut «isPresent» = Faux;
11  Ajouter un rendez-vous de traitement après le dernier traitement prévu à la même plage et sur la même machine
      à laquelle était affecté depuis le début de son traitement;
12 fin
  
```

---

**Conclusion :**

Comme le montrent les différents éléments intégrés dans notre modèle, le simulateur est conçu pour modéliser le processus complet en radiothérapie ainsi que la trajectoire des patients. Nous pourrions ainsi, évaluer plusieurs stratégies de planification des rendez-vous (CHUM, CICL, etc.). Ce simulateur sera vérifié et validé avant de pouvoir être utilisé par la suite dans d'autres centres radio-oncologiques.

## CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODÈLE ET RÉSULTATS

L'objectif principal d'un modèle de simulation est de pouvoir l'utiliser pour comparer différents scénarios et identifier ce qui arriverait aux différents systèmes si des changements étaient mis en place. Les résultats de ces scénarios peuvent être utiles en proposant le scénario optimal pour un centre radio-oncologique donné. Avant d'entamer cette phase, il paraît indispensable de s'assurer que le modèle est capable de reproduire une représentation précise et fiable du système actuel.

Dans ce chapitre, nous présentons une vérification et une validation du simulateur, suivent les résultats trouvés lors de l'étude des scénarios « *What-if* ». Notons qu'afin de pouvoir paramétrer le modèle et de définir des instances pour différents scénarios qui serviront à valider et évaluer la performance du simulateur, nous utilisons des données réels provenant du CICL.

### 5.1 Vérification et validation

Le modèle fait l'objet d'une étape de vérification et de validation. En effet, la vérification doit assurer que le modèle développé respecte l'objectif de notre projet et qu'il répond à la mission pour lequel il a été fait. Quant à la validation, elle doit montrer que pour toutes les activités modélisées, sont en conformité avec la réalité et qu'aucune erreur n'a été intégrée dans la définition du système global.

#### 5.1.1 Vérification du modèle

Durant notre projet, nous étions en mesure de vérifier une grande partie de la fonctionnalité lors du développement du modèle tout en suivant une approche itérative incrémentale. En effet, nous avons commencé par découper séquentiellement le processus de radiothérapie sous forme des phases: la première phase à la première itération et à chaque itération, nous avons sélectionné une phase et l'avons implémentée dans le simulateur jusqu'à l'obtention d'une version finale du processus complet. De cette façon, nous avons pu augmenter le modèle avec le temps d'une façon incrémentale tout en vérifiant le résultat de chaque itération et tout en affinant les problèmes de codage rencontrés. Nous avons évité ainsi de détecter les risques trop tard et de multiplier les retours en arrière. Le processus d'implémentation est représenté dans la figure 5.1.

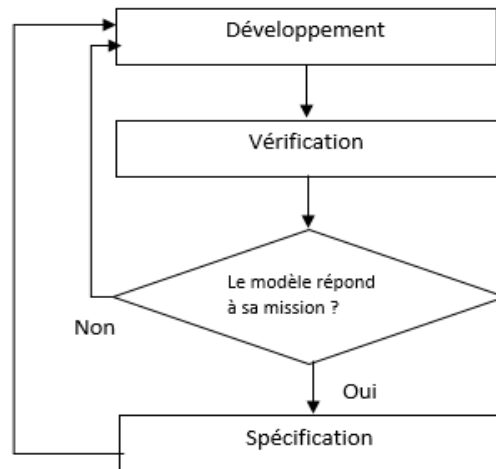


Figure 5.1: Processus d'implémentation et de vérification

Le cœur du processus de chaque itération est le suivant :

- Spécification : c'est le choix de la phase à incrémenter dans le simulateur.
- Développement : il s'agit de la réalisation concrète et du codage de la phase choisie.
- Vérification : c'est l'ensemble des tests qui permettent de s'assurer que le développement effectué correspond bien à aux attentes.

Une fois que le modèle complet est vérifié, nous passons, ensuite, à la validation: le processus de comparaison du modèle avec le système qu'il est censé représenter.

### 5.1.2 Validation du modèle

La validation est un ensemble de méthodes permettant de juger la précision d'un modèle à faire des prévisions pertinentes. La principale façon de valider un modèle, est de montrer qu'il s'agit bien d'une représentation exacte du système réel. Elle consiste à comparer les différents indicateurs de performance du modèle avec ceux du système réel.

#### a) Conditions initiales de la simulation

Pour débiter le processus de validation, il est indispensable de définir une durée de réchauffement, une durée de simulation et un cadre expérimental pour notre étude.

- **Durée de réchauffement**

La durée de réchauffement est la période durant laquelle la simulation est exécutée sans recueillir les résultats. Elle sert à initialiser le système tout en remplissant les files d'attente afin qu'elles

soient d'une longueur réaliste (plutôt que de commencer à vide). Le calcul de cette période est un problème qui a été abordé par plusieurs chercheurs. Hoad et al., (2010) a proposé une méthode graphique pour la résolution avec une durée de réchauffement déterminée en examinant la série chronologique de la file d'attente faisant l'objet d'étude. Pour ce faire, nous avons lancé la simulation pour 15 jours et avons enregistré la taille de la file d'attente caractérisée par le nombre de patients en attente pour le premier traitement. Par la suite, nous avons exécuté la simulation pendant 15 jours supplémentaires jusqu'à la stabilisation de la taille de la file d'attente considérée. Les valeurs enregistrées pendant chaque période sont présentées dans la figure 5.2 sous forme d'une série chronologique.

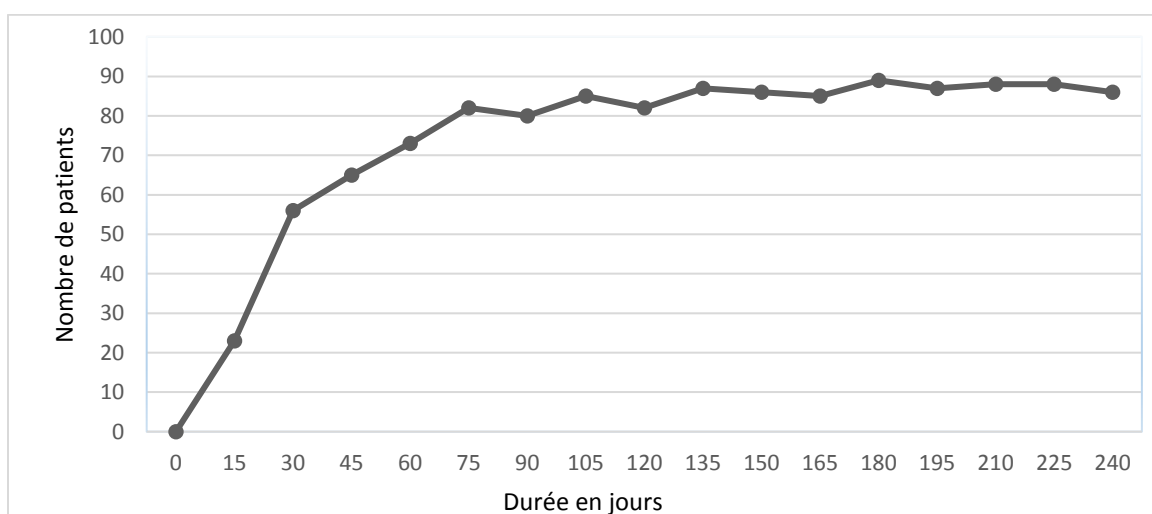


Figure 5.2: Série chronologique montrant le nombre des patients dans la file d'attente pour un premier traitement

Le nombre des patients observé commence toujours par zéro vu que le modèle démarre à vide. Après, il augmente et converge pour une valeur qui varie entre 80 et 89 à partir du 75<sup>ième</sup> jour. Donc, une période d'environ 75 jours a été fixée, car, à partir de ce moment nous avons observé une stabilisation. Il faut noter que tous les indicateurs recueillis pendant cette durée, sont écartés de notre étude.

- **Durée de Simulation**

Il est recommandé que les temps d'exécution soient aussi grands que possible pour inclure au moins 1000 occurrences de chaque type d'évènement. Donc, nous avons décidé d'exécuter la simulation

sur une période de deux années pour avoir une bonne représentation du système et des files d'attentes.

- **Loi d'arrivée des patients**

Afin de générer de façon réaliste des arrivées tout au long de la journée, nous avons besoin d'une loi permettant d'espacer les arrivées plutôt que de les laisser se produire une à la fois au début de chaque journée. Nous avons supposé que les arrivées quotidiennes sont le résultat d'une loi de Poisson, ce qui signifie que les intervalles de temps entre deux événements d'arrivée successifs sont répartis de façon exponentielle tout au long de la journée. La distribution exponentielle est unique en ce qu'elle a la propriété d'être sans mémoire, ce qui signifie que le temps jusqu'à ce que la demande de consultation suivante commence, le processus est indépendant du temps depuis que la dernière demande de consultation a commencé le processus. Nous notons, également, que la loi de Poisson est couramment utilisée dans plusieurs travaux pour modéliser les arrivées dans les centres radio-oncologiques. Parmi ces travaux, nous citons celui de Taobane, (2012) qui a étudié la simulation des flux avec le CICL et qui a pu récupérer des mesures recueillies du centre entre les mois avril et juin 2012. Par la suite, il a modélisé l'arrivée avec une loi de poisson avec une moyenne de 6.9 nouveaux patients par jour. Dans notre projet, nous avons borné cette valeur à 7 nouveaux cas, valeur maximale observée sur cette période.

- **Nombre de répliques**

Afin d'avoir un bon intervalle de confiance, toutes les données obtenues lors de l'étape de validation du modèle sont le résultat de 30 répliques du modèle. Chaque réplique est exécutée pour une période de préchauffage de 75 jours suivie d'une durée d'exécution de 2 années.

## **b) Résultats de la validation**

Pour valider notre modèle, nous avons comparé les résultats obtenus par simulation et ceux observés lors de la collecte des données et pour différents indicateurs pertinents de notre système. Afin d'évaluer les impacts des stratégies de planification sur le nombre de patients traités, leurs temps d'accès et l'utilisation des ressources, nous utilisons les indicateurs clés suivants: les données de sortie ; le temps d'accès moyen pour chaque catégorie du patient, le pourcentage de patients traités en retard et le pourcentage d'occupation des machines de traitement.



- **Quantité des patients traités**

Les résultats simulés obtenus par le modèle montrent qu'en moyenne, 2405 patients ont été traités dans le CICL. Le tableau 5.1 présente les résultats obtenus et les compare avec ceux observés.

Tableau 5.1: Patients traités et proportion de retard

Catégorie	Patients traités			Patients traités en retard				
	Observé	Simulé	Écart absolu	Observé	%	Simulé	%	Écart absolu
<b>P1</b>	90	106	15	37	41	39	36	2.7
<b>P2</b>	450	419	6.88	105	23	99	24	5.7
<b>P3</b>	1420	1541	8.20	195	14	195	13	0
<b>P4</b>	353	339	3.9	0	0	0	0	0

- **Taux d'utilisation des accélérateurs linéaires**

La figure 5.3 montre une comparaison pour les quatre machines de traitements disponibles au CICL.

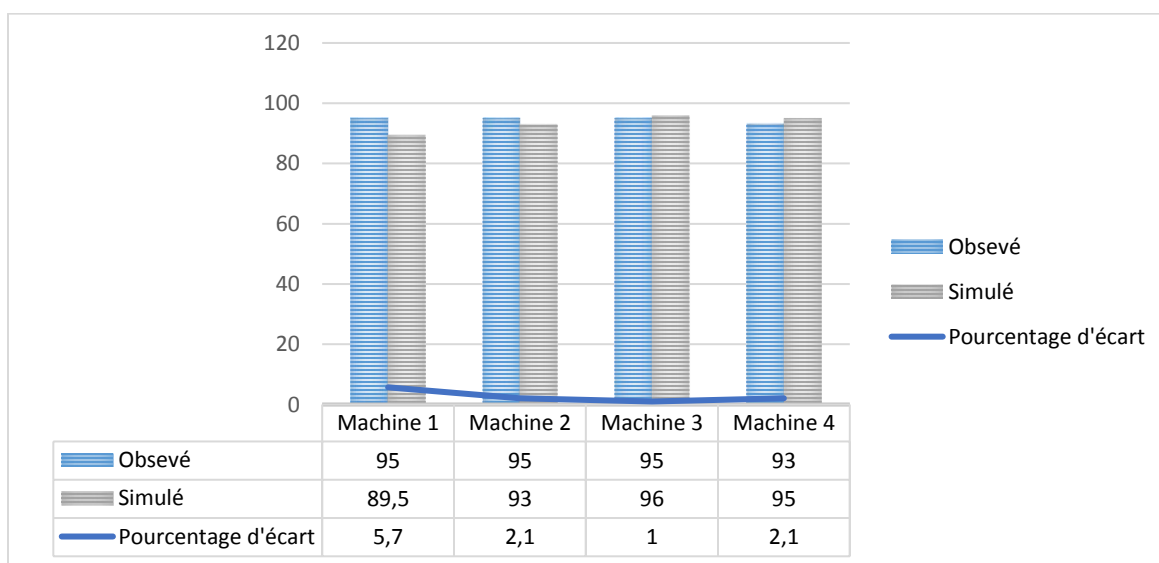


Figure 5.3: Comparaison de taux d'occupation des accélérateurs linéaires

Pour toutes les catégories des patients, nous constatons que les écarts absolus entre les valeurs observées et simulées varient de 0% à 8% selon l'indicateur choisi. La seule mesure pour laquelle il y a un certain décalage est le nombre des patients traités du type P1. Cela est probablement dû à l'hypothèse utilisée pour la dosimétrie. En effet, certaines hypothèses sont utilisées pour l'estimation de temps de la dosimétrie : plusieurs d'entre elles représentent ce qui passe en réalité, d'autres sont posées pour des raisons pratiques afin de simplifier la complexité des processus. Donc, le fait d'avoir des indicateurs qui s'approchent de la réalité prouve que la validité du simulateur n'est pas mise en doute.

- **Calibrage du paramètre de la loi de distribution d'arrivée des patients**

Selon le scénario initial simulé, le centre pourrait traiter, environ 2405 sur une période de deux ans dans le cas du CICL. Ceci ne représente que 80.1% des prévisions établies, lors de l'ouverture. À travers les scénarios, deux causes principales ont été avancées, une sous-utilisation des plages horaires au niveau des accélérateurs linéaires (95% d'utilisation) ainsi qu'une variabilité du processus d'arrivée des patients. Donc, la demande modélisée est inférieure à la capacité réelle des accélérateurs linéaires. Dans ce contexte, un ajustement de l'arrivée des patients est nécessaire. Donc, l'approche utilisée est de déterminer la demande maximum que les accélérateurs linéaires peuvent supporter tout en respectant la grille de classification. Par la suite, l'arrivée est modélisée avec une loi de poisson avec une moyenne de 8.62 nouveaux patients par jour. Autrement dit, le paramètre de la distribution exponentielle d'arrivée des patients trouvée est 1.16, signifiant en moyenne un délai entre les arrivées de patients de 1,16hr. Ceci donne environ 1300 patients tel que calculé dans la sous-section précédente.

### **5.1.3 Aspect générique du modèle**

La principale motivation de notre projet est le développement d'un modèle de simulation à événements discrets « générique ». Autrement dit, nous sommes intéressés de voir si cette approche « générique » pourrait être étendue et utilisée pour simuler la trajectoire des patients, les règles de priorisation et de planification ainsi que les différents scénarios dans plusieurs centres radio-oncologiques (la généricité des composants informatiques développés implique un potentiel d'utilisation multiple).

Pour aider à définir l'aspect « générique », nous utilisons la définition de Fletcher et Worthington (2009), qui se déclinent sous: (i) l'abstraction du modèle, (ii) la langue du logiciel et de la programmation, et (iii) la réutilisabilité des modèles (Fletcher et Worthington (2009)).

- **Abstraction du modèle**

En termes généraux, Fletcher et Worthington (2009), affirment qu'un modèle générique doit être flexible, intuitif et simple. Pour les centres radio-oncologiques, les services de soins se caractérisent par des problèmes d'attente (files d'attente), la disponibilité des équipements et des ressources humaines, etc. Ces problèmes ont être regroupés dans un cadre de modélisation avec des modules représentant ces processus génériques collectés de plusieurs centres (Consultation, Contour, etc.). Combinée aux données d'entrée du CICL, cette modélisation permet à l'utilisateur de générer un modèle générique pour un centre spécifique comme le CICL mais aussi pour d'autres centres radio-oncologiques. Par exemple, toutes les entrées (la disponibilité des ressources, le nombre des accélérateurs linéaires, etc.) pourraient être changées d'un centre à un autre sans devoir entrer dans les détails du codage et programmation informatique. Pour ce faire, nous avons utilisé des fichiers « XML » permettant de faire les changements nécessaires et d'adapter les entrées aux données réelles du centre étudié. Aussi, il est possible d'annuler les étapes non applicables en saisissant une valeur zéro. Donc, il s'agit d'un modèle « générique au réglage » où plusieurs changements dans les données d'entrée sont utilisés pour représenter différents centres.

- **Programmation**

Il est intéressant de noter que la prise en compte de cette dimension n'est que peu traité dans la littérature, à l'exception de Robinson et al., (2004). Le but de ce critère est de considérer la modélisation en termes de dimension logiciel/programmation:

- Langage de programmation le plus générique : nous avons utilisé JAVA afin d'assurer la possibilité d'intégration des modules d'optimisation;
- Ensemble de simulation : nous avons utilisé SSJ (bibliothèque spécialisée dans la simulation à événements discrets);
- Modèle générique construit avec les modules suivants :

- Développement des calendriers et des blocs variables pour la modélisation de la disponibilité des ressources (les médecins et les machines de traitements);
- Modélisation des machines de traitement avec différentes techniques et différents calendriers de traitements;
- Développement des protocoles des traitements qui définissent des durées de traitement variables et qui dépendent du type de cancer et de la technique de traitement utilisée;
- Implémentation d'une trajectoire non linéaire qui dépend de la priorité et du site du cancer;
- Développement des différentes règles de gestion des files d'attente;
- Développement des différentes règles de planification des rendez-vous.

- **Réutilisabilité du modèle**

Robinson et al. (2009), ont discuté la possibilité de réutilisation d'une partie jusqu'à la réutilisation complète du modèle. Les principaux avantages de la réutilisation du modèle sont identifiés comme le temps et la cohérence des résultats. En effet, la réutilisabilité du modèle développé dépend directement des deux autres dimensions citées ci-dessus (abstraction et programmation).

D'un centre à un autre, une étape d'ajustement au niveau des entrées est primordiale afin de présenter l'état réel de chaque centre en termes des ressources, des trajectoires, des processus, etc. Dans ce projet, nous allons utiliser les seules données disponibles du CICL afin de pouvoir tester la validité et la performance de notre modèle de simulation. Mais il sera primordial, dans le futur, de récupérer d'autres données afin de tester d'une part la réutilisabilité du modèle et les différents scénarios d'amélioration.

## **5.2 Résultats**

Une fois que le modèle validé, nous testons différents scénarios « what-if ». Avant d'entamer cette étape, nous avons analysé le scénario initial, c'est-à-dire l'état existant du CICL, pour pouvoir poser un jugement sur le système étudié, mettre en évidence les causes de dysfonctionnement et cerner, par la suite, les pistes d'amélioration possibles.

### 5.2.1 Scénario initial

Les diagrammes présentés dans la figure 5.4 montrent la moyenne du temps d'accès pour les 4 catégories des patients. Chaque diagramme est représenté par une boîte à moustache permettant de présenter la médiane, les 5<sup>e</sup> et 95<sup>e</sup> centile et les extrêmes. Tous les temps d'accès sont exprimés en jours.

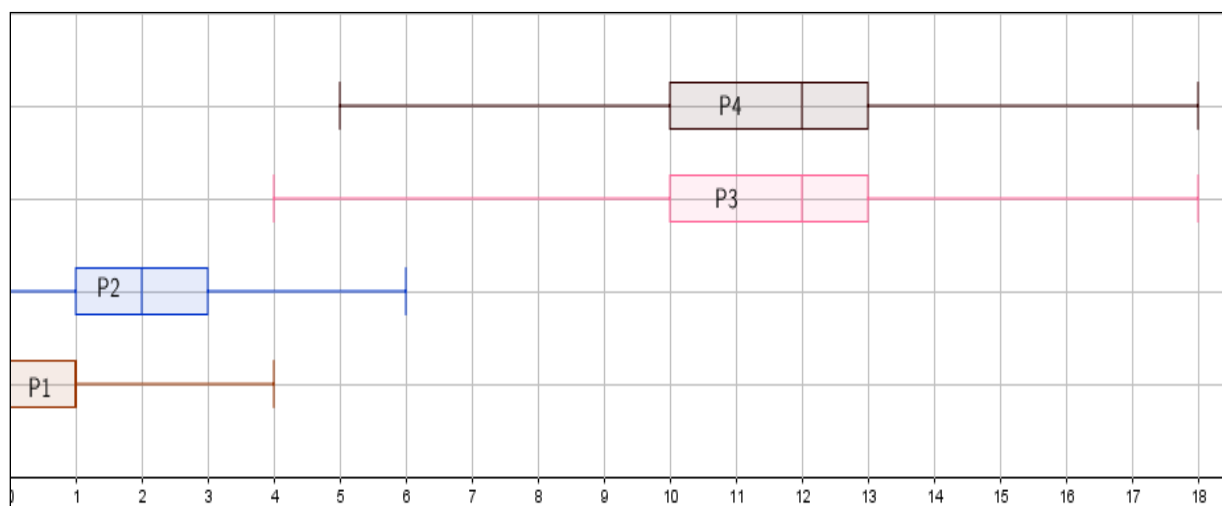


Figure 5.4: Temps d'accès en jours pour les quatre catégories des patients

Avec le scénario initial, nous pouvons cerner directement un potentiel d'amélioration possible au niveau du temps d'accès pour les patients urgents P1 et les patients palliatifs P2 qui souffrent le plus à cause du pourcentage élevé des retards.

Il faut noter que dans la suite du rapport, nous allons utiliser les abréviations présentées dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2: Abréviations des délais entre les phases de traitement

Abréviations	Signification
T1	Délai entre l'arrivée et la consultation
T2	Délai entre la consultation et le CT-SIM
T3	Délai entre le CT-SIM et le premier traitement
T4	Temps d'accès

- **Analyse des délais:**

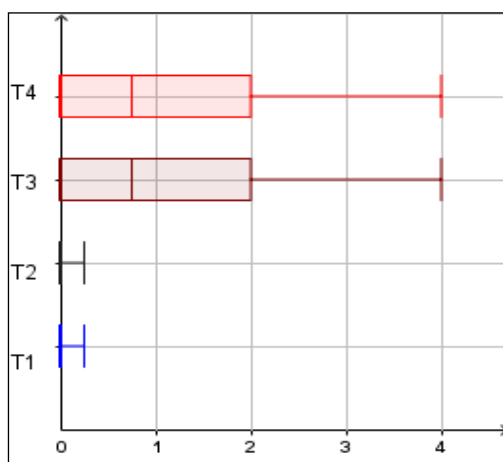


Figure 5.5.a : Délai entre les rendez-vous des patients palliatifs P1

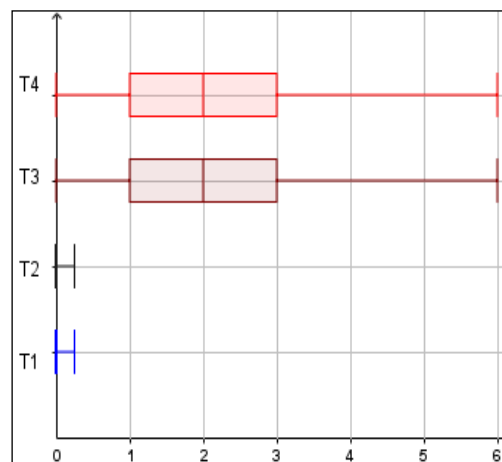


Figure 5.5.b : Délai entre les rendez-vous des patients palliatifs P2

En faisant l'analyse des délais entre les différentes phases de prise en charge de patients (figure 5.5.a et 5.5.b), il est intéressant de voir que les P1 et les P2 obtiennent leurs rendez-vous pour la consultation et pour le CT-SIM le jour même d'arrivée. Nous remarquons que l'attente est presque nulle durant la phase de prétraitement et qu'il semble possible de la finir en une seule journée. Par contre, nous constatons un problème d'accessibilité pour la simulation et le traitement sur les accélérateurs linéaires. En effet, le délai entre l'arrivée et le premier traitement est en moyenne supérieur à la norme d'un seul jour pour les P1 et de trois jours pour les P2 pour le 3ème quartile des répliques (25% de patients). Les machines de traitement représentent alors les goulots d'étranglement limitant, d'une part les performances globales du CICL et d'autre part le respect de délais d'accès aux soins.

Tableau 5.3: Jour de référencement des patients en retard pour le premier traitement

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
<b>P1</b>	0	0	0	0.1	99.9
<b>P2</b>	0	0	0	0.25	99.75

En faisant une étude sur le jour d'arrivée des patients ayant reçu leur premier traitement en retard (tableau 5.3), nous remarquons que le vendredi représente la journée problématique pendant laquelle les patients n'arrivent pas à prendre leurs traitements dans les délais et doivent attendre le weekend pour relancer le processus du traitement. A la lumière de ces résultats, il apparaît évident qu'il faut proposer des solutions, par exemple la réservation de plages horaires sur les machines de traitements le vendredi pour les patients palliatifs.

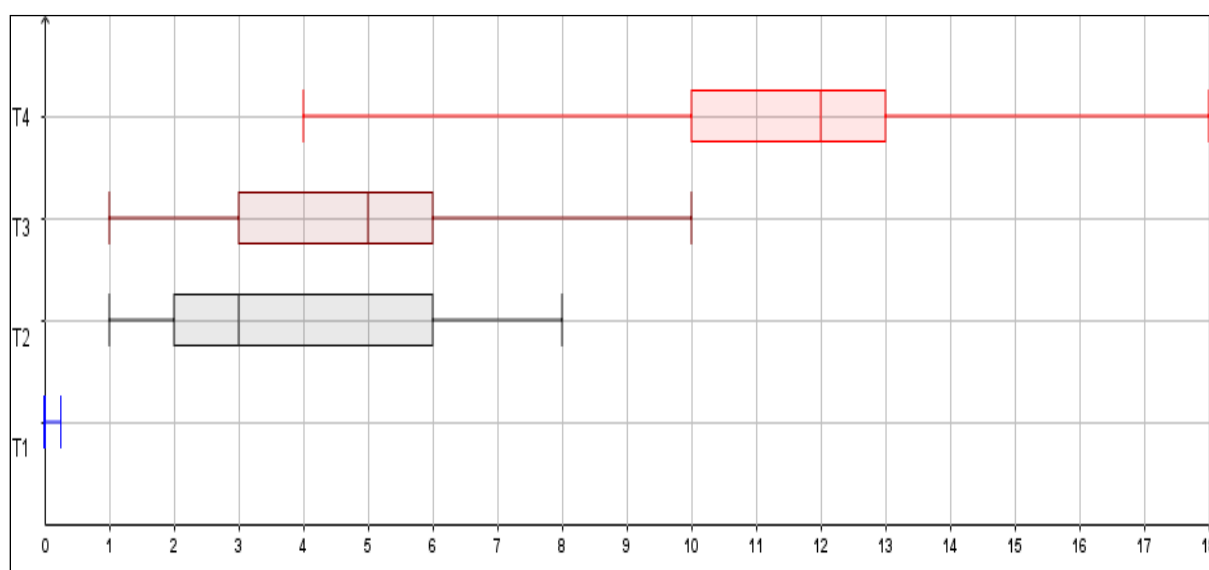


Figure 5.6: Délai entre les rendez-vous des patients curatifs P3

Même pour les patients curatifs 14, le délai entre l'arrivée et la consultation est presque nul. Ceci est expliqué par le fait qu'une demande de consultation peut être traitée dès son arrivée par un agent administratif et être affectée par la suite au premier oncologue disponible pouvant prendre en charge le patient. Par contre, le délai entre la consultation et le CT-SIM est assez variable : 25% des patients le reçoivent dans plus de 6 jours. Cette attente vient du fait qu'un patient curatif ne peut recevoir son scan que si le médecin auquel il est affecté, a une activité de type planification.

Cette attente affecte l'utilisation des scanners qui sont sous exploitées et presque jamais utilisées à pleine capacité (environ 45% d'utilisation). Autrement dit, les calendriers d'oncologues limitent, d'une part, la circulation des flux des patients et retarde, d'autre part, la prise en charge du patient curatif dans les étapes qui suivent. Le début du traitement semble aussi problématique pour presque 25% de réplifications: le temps d'accès moyen est supérieur à 14 jours (celui de la grille de classification). Par conséquent, une réorganisation dans l'emploi des médecins pourrait être envisagée pour mieux optimiser l'utilisation des ressources matérielles et limiter par la suite les retards.

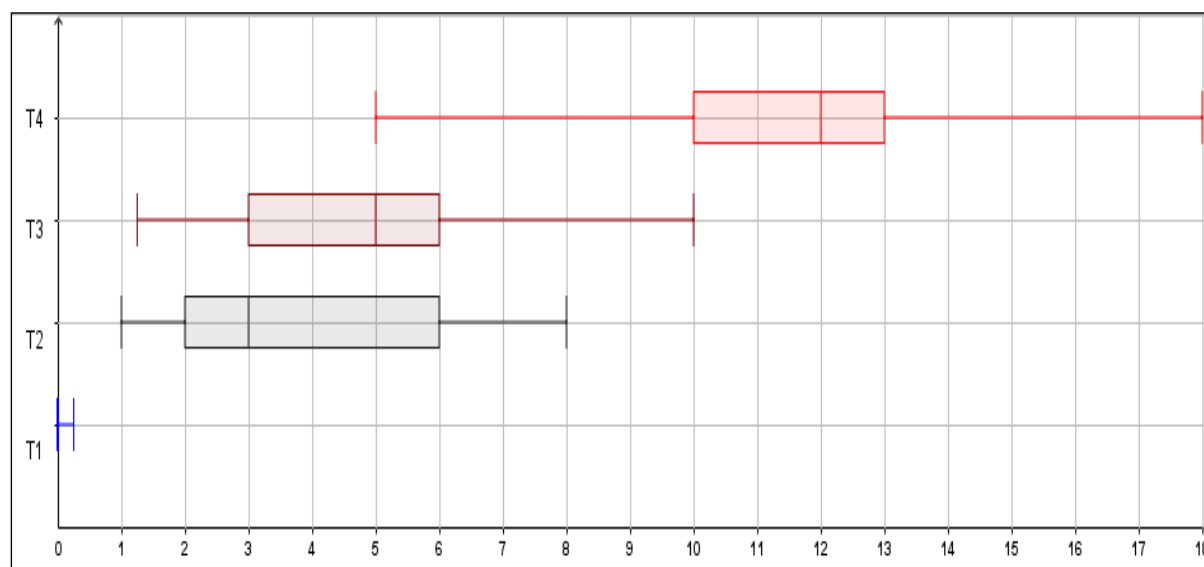


Figure 5.7: Délai en jours entre les rendez-vous des patients curatifs P4

Comme le centre traite tous les patients curatifs avec la même priorité et avec les mêmes règles de gestion, celle de « FIFO », les délais observés sont alors semblables à ceux des patients curatifs 14. Notons aussi que les délais sont respectés pour toutes les réplifications.

Par conséquent, une solution doit être mise en évidence afin d'améliorer les statistiques de prise en charge et d'intégrer la gestion de priorité pour les différents types des patients (en particulier pour les curatifs) afin de récompenser les retards observés avec les curatifs P3.

- **Taux d'occupation des accélérateurs linéaires**

En analysant les délais des patients, nous avons conclu que les accélérateurs linéaires représentent des postes goulots. Du coup, il paraît primordial d'estimer son taux d'utilisation. Malheureusement, nous n'avons pu suivre le taux d'utilisation de chacun pour une période de 2 années mais nous



avons plutôt opté pour la technique d'échantillonnage sur notre population d'origine dans laquelle nous tirerons ultérieurement des échantillons de taille  $n$ . Pour ce faire, nous avons commencé par calculer la taille d'échantillon pour assurer une certaine fiabilité et représentativité des données échantillonnées. Généralement, il faut utiliser la formule suivante pour calculer la taille d'échantillon  $n$  :

$$n = \frac{z^2 p(1-p)}{d^2} = 191$$

Avec :

- $z$  = niveau de confiance selon la loi normale centrée réduite (pour un niveau de confiance de 95%,  $z = 1.96$ )
- $p$  = proportion estimée de la population qui présente la caractéristique (lorsque inconnue, on utilise  $p = 0.5$ )
- $d$  = marge d'erreur tolérée (par exemple on veut connaître la proportion réelle à 8% près)

Le graphique 5.8 présente l'évolution du nombre de plages utilisées pour les 4 accélérateurs linéaires durant 191 jours.

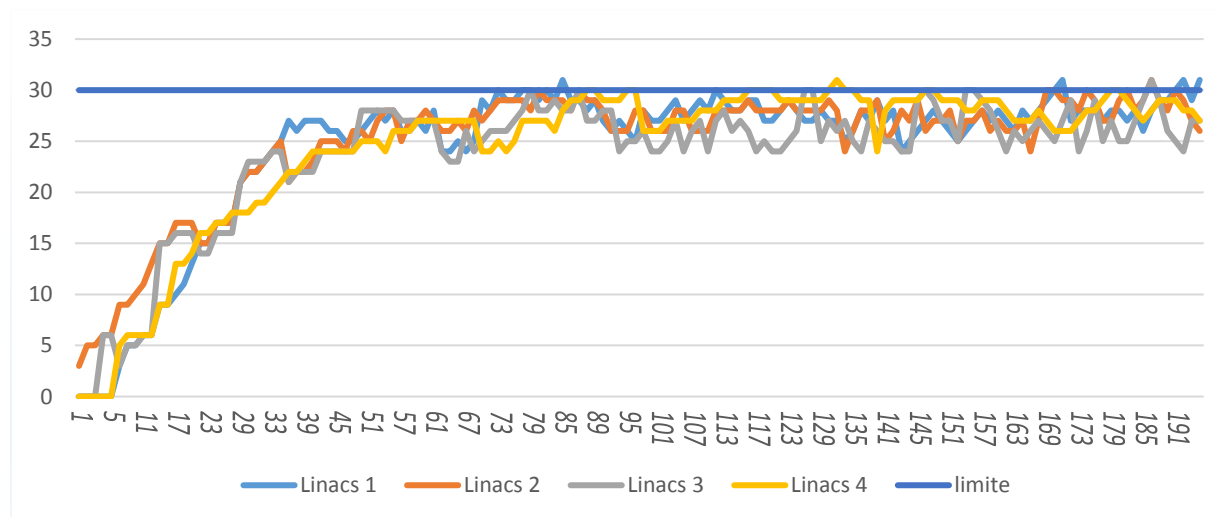


Figure 5.8: Évolution des plages utilisées pour chaque accélérateur linéaire

Même après la période de réchauffement, nous constatons qu'il a fallu 50 jours au département pour s'approcher de la capacité maximale des accélérateurs qui est égale à 30 plages horaires par jour. Globalement, les accélérateurs linéaires ne sont jamais occupés à plus que 95% à part pour quelques jours où il y avait des dépassements et des pics au niveau de la capacité maximale. Ces

pics correspondent principalement au fait qu'un patient urgent doit être traité le même jour de son arrivée et que nous avons autorisé dans le modèle un pourcentage de non ponctualité: 2% des patients arrivent en retard pour une séance de traitement et doivent être pris en charge soit dans les plages horaires disponibles (s'il y en a), soit durant les heures supplémentaires (après 17h). Donc, les résultats obtenus prouvent que la règle de planification sur les machines de traitement n'est probablement pas la plus efficace puisqu'elle n'assure pas l'utilisation complète de la capacité disponible. En effet, les rendez-vous sont attribués en cherchant la première plage disponible permettant de traiter le patient sur la même machine sur des journées consécutives. A ce niveau, il paraît intéressant d'étudier la possibilité d'opter pour d'autres règles de planification de rendez-vous ou même d'intégrer un modèle d'optimisation dans le simulateur, capable de chercher la meilleure plage horaire disponible et de remplir toutes les plages disponibles pour les traitements.

- **Taux d'occupation des scanners**

En analysant les données de sortie du simulateur, les deux scanners n'ont jamais été considérés comme de postes goulots pour la circulation des patients curatifs et palliatifs. D'après la figure 5.9, le scanner possède suffisamment des plages disponibles. En effet, chaque scanner a une capacité journalière de dix plages et il n'existe que 2% de journées (sur 2 années) pendant lesquelles le nombre de plages est à 11. Ceci est expliqué principalement par une fluctuation de la demande.

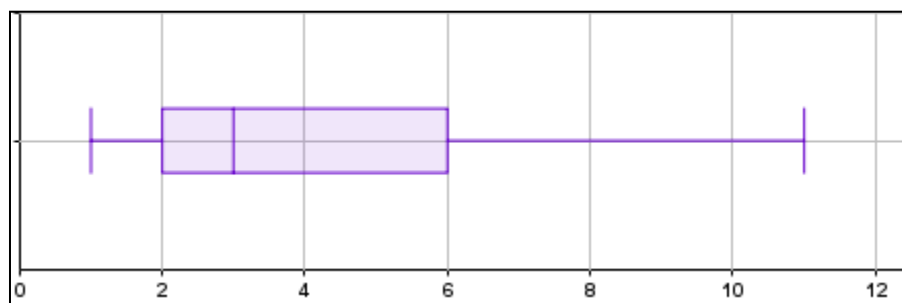


Figure 5.9: Nombre de plages des scanners utilisées par jour en moyenne

### 5.2.2 Scénarios « *What-if* »

L'avantage avec la simulation est la variété des changements que nous pouvons tester. Dans ce projet, nous allons nous limiter à quelques scénarios que nous souhaitons proposer comme étant des solutions pertinentes pour les problèmes rencontrés au CICL. Nous utilisons également ces analyses pour avoir une idée de l'ampleur du changement auquel nous pouvons nous attendre si

divers scénarios sont mis en œuvre dans le système actuel. Nous évaluons les changements apportés aux niveaux de ressources, en terme d'utilisation optimale, ainsi que les changements apportés aux délais d'attente de patients.

#### a) Scénario 1-Changement à l'horaire des oncologues

En analysant l'état actuel, nous détectons un problème dans les délais entre la consultation et le CT-SIM pour les patients curatifs dû principalement à l'organisation des emplois des oncologues. Le tableau 5.4 présente l'horaire des oncologues dont l'organisation est faite sous forme des activités de différents types. Les types possibles sont la consultation (C), la relance des patients en cours des traitements et suivi (R), la planification (P), la dosimétrie (D), l'implication au centre (I) et les tâches administratifs (A).

Tableau 5.4: Organisation initial des activités pour les oncologues du CICL

	Lundi		Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
<b>MD A</b>	C	C	P	P	C	D	C	I	R	D
<b>MD B</b>	D	C	P	P	D	C	R	C	D	I
<b>MD C</b>	R	D	C	C	P	P	C	D	I	C
<b>MD D</b>	I	C	C	D	R	C	P	P	C	D
<b>MD E</b>	C	D	R	C	I	D	C	C	P	P
<b>MD F</b>	D	I	C	C	D	R	P	P	D	C
<b>MD G</b>	P	P	D	I	A	A	D	C	C	R

En observant l'horaire actuel, nous remarquons que les médecins ont seulement deux plages de planification qui sont placées durant une seule journée (une seule tâche par jour). D'ailleurs, un patient arrivé un mardi et consulté le jour même par l'oncologue G, ne recevra son CT-SIM que la semaine d'après. Clairement, il existe un problème d'alignement des activités de médecins par rapport à la demande de nouveaux patients. Donc, partant du fait que les oncologues représentent les ressources ayant plus d'impact sur tout le processus de radiothérapie, l'idée est d'établir un horaire hebdomadaire cyclique qui assure un nombre suffisant des consultations permettant de

satisfaire la demande des nouveaux patients et de minimiser les délais excessives entre les différentes phases du processus complet et réservant, par conséquent, la conformité et le respect des standards liés aux temps d'accès. Pour ce faire, nous utilisons le calendrier des activités élaborées par Niroumandrad (2015) qui a étudié l'optimisation des calendriers des oncologues dans le but de minimiser les temps d'accès.

Tableau 5.5: Nouvelle Organisation des activités pour les oncologues du CICL

	Lundi		Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi	
	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
<b>MD A</b>	C	C	C	P	C	D	P	I	R	D
<b>MD B</b>	D	C	C	P	D	C	R	P	D	I
<b>MD C</b>	R	D	C	C	C	P	C	D	I	P
<b>MD D</b>	I	C	C	D	R	C	P	C	P	D
<b>MD E</b>	P	D	R	C	I	D	C	C	P	C
<b>MD F</b>	D	I	C	C	D	R	C	P	D	P
<b>MD G</b>	C	P	D	I	A	A	D	C	P	R

Avec cet horaire, les activités s'enchainent de sorte que toutes les consultations sont suivies par des activités de planification afin d'assurer l'alignement des activités de chaque oncologue par rapport aux nouveaux patients arrivés.

- **Quantité des patients traités**

Dans ce scénario, 2402 patients ont été traités (Environ 99 % par rapport au scénario initial). Le tableau suivant présente le nombre moyen des patients traités par catégorie ainsi que le nombre de ceux traités en dehors des normes.

Tableau 5.6: Patients traités et proportion de retard pour le scénario 1

Catégorie	Patients traités	Patients consultés en retard		Patients traités en retard	
		Nombre	%	Nombre	%
<b>P1</b>	103	0	0	38	37
<b>P2</b>	414	0	0	103	25
<b>P3</b>	1543	0	0	92	6
<b>P4</b>	342	0	0	0	0

Ce changement apporte deux améliorations significatives dont la première est l'augmentation du nombre des patients curatifs traités et la deuxième est la minimisation de la proportion des patients traités en retard. Nous observons que le pourcentage des patients palliatifs traités en retard augmente peu par rapport au scénario initial. Donc, ce calendrier présente une limite puisque l'objectif principal est de traiter tous les patients à l'intérieur des délais prescrits. C'est pourquoi, il paraît intéressant de développer un modèle d'optimisation en nombres entiers pour les horaires de médecins assurant le respect de la capacité de chacun, l'alignement des activités allouées par rapport aux demandes des nouveaux patients (satisfaire les demandes) et aussi l'alignement des activités allouées par rapport aux capacités des autres ressources disponibles dans les autres stages du processus pour éviter les goulots d'étranglements.

- **Analyse des délais**

Ce changement a été proposé afin de réduire les délais d'attente entre la consultation et le CT-SIM pour les curatifs. En optant pour les nouveaux horaires, les patients curatifs recevront leur CT-SIM dans un délai maximal de 6 jours et 50% le recevront en 4 jours. Par conséquent, l'augmentation d'efficacité dans la phase de préparation fait en sorte que ces derniers reçoivent leur traitement plus vite que le scénario initial. Donc, les patients curatifs sont traités dans des délais plus courts que dans le scénario initial.

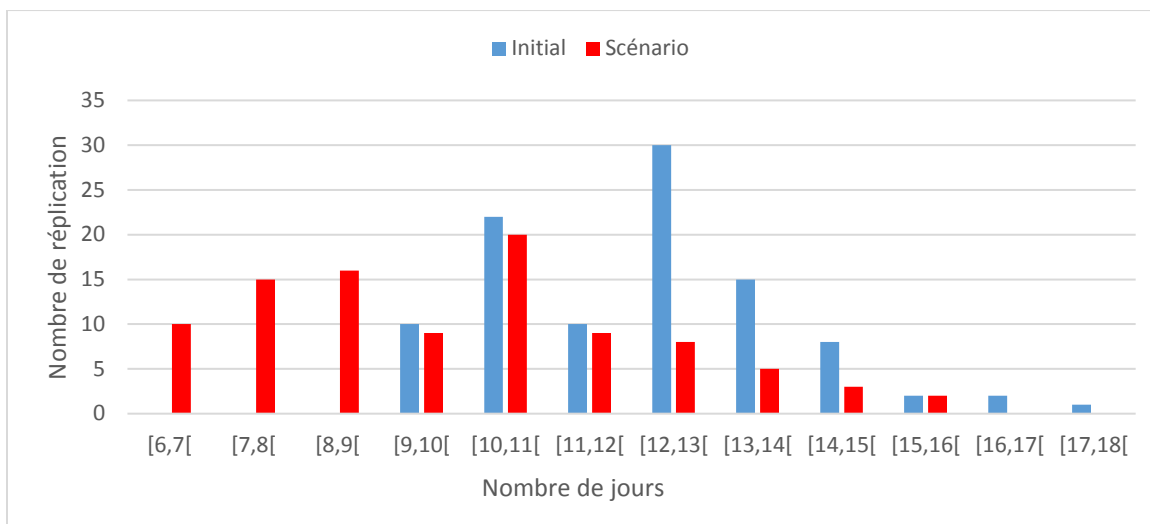


Figure 5.10: Délai entre la consultation et le premier traitement pour les curatifs 14

La figure 5.10 nous permet de conclure que ce changement réduit l'attente entre la consultation et le premier traitement pour les patients curatifs. Ce qui fait que les patients curatifs 14 reçoivent leur traitement plus rapidement en moyenne que dans le scénario initial, tout en passant en moyenne de 11,74 à 10,53 jours pour les patients curatifs 14. Même s'il s'agit d'une amélioration d'un peu plus d'un jour, ces réductions sont primordiales pour des patients qui luttent pour leur rémission.

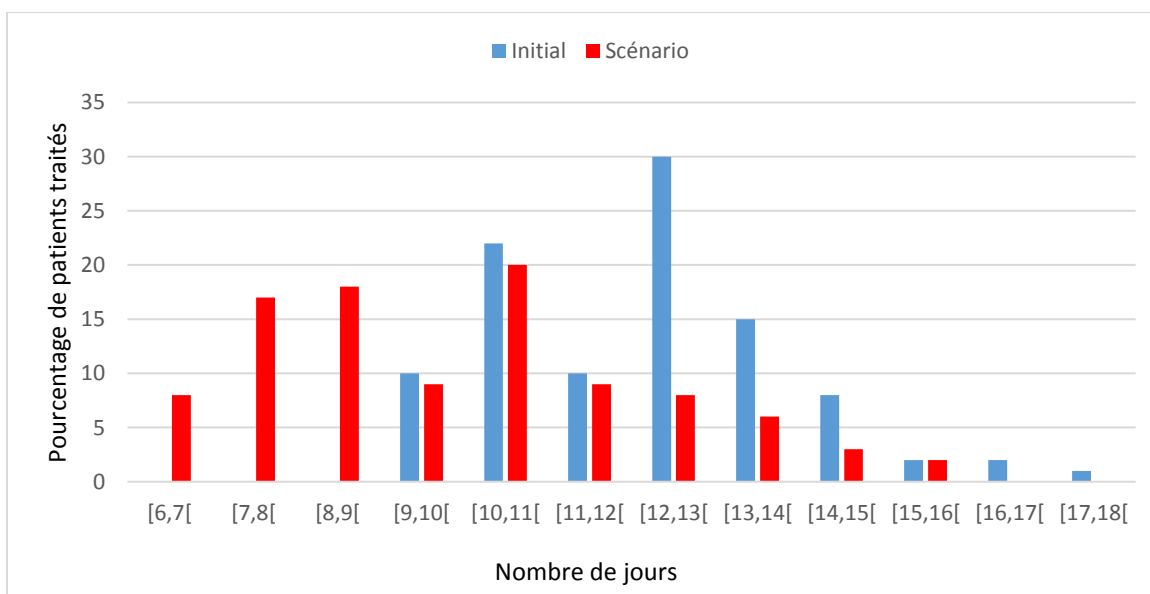


Figure 5.11: Délai entre la consultation et le premier traitement pour les curatifs 28

Pour les patients curatifs 28, les attentes entre la consultation et le premier traitement passent, en moyenne, de 12.15 à 10.95 jours (figure 5.11). La réduction des délais chez les curatifs 28 est alors

semblable à celle des curatifs 14. Ceci est expliqué par le fait que le centre traite tous les patients avec la même priorité et sont traités par la suite, en fonction de leur date d'arrivée (Premier arrivé, premier servi).

### **b) Scénario 2-Changement aux compétences des oncologues**

Au CICL, près de la moitié de tous les nouveaux cas référés sont attribuables au cancer de la prostate (pour les hommes) et au cancer du sein (pour les femmes). D'après les données historiques, des délais d'attente excessifs sont enregistrés pour les patients curatifs 14 ayant l'un de ces deux cancers. Donc, nous pouvons conclure que ces deux types de cancer ayant la charge la plus élevée interviennent directement dans l'allongement des listes d'attentes et par la suite dans la baisse des indicateurs de performance.

L'idée dans ce scénario est de supposer que ces deux types de cancer peuvent être traités par tous les oncologues au sein du centre radio-oncologique. Cette intervention est déjà une pratique quotidienne dans de nombreux centres où tous les oncologues sont autorisés à traiter un patient palliatif quel que soit son type de cancer. Donc, nous considérons une modification dans les types de patients que chaque médecin peut traiter: les deux plus grands groupes de patients peuvent être traités par tous les médecins.

- **Analyse des délais**

L'objectif de ce changement est de minimiser la proportion de retard chez les patients curatifs, ayant soit un cancer « sein » ou un cancer « métastase », afin de réduire leur temps d'accès.

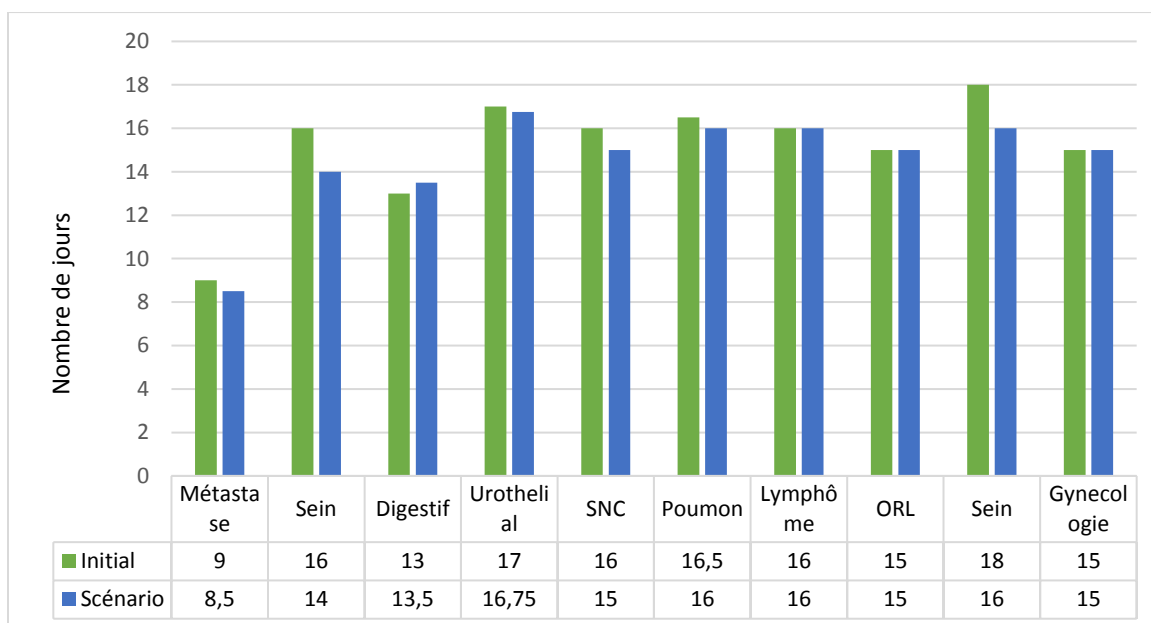


Figure 5.12: Temps d'accès maximal pour les différents types de cancer chez les patients curatifs

Nous constatons que les temps d'accès simulés pour les patients curatifs sont réduits légèrement. Cela est dû à la flexibilité introduite dans les compétences des médecins. En effet, d'après le tableau 5.6, nous pouvons remarquer que ce changement ne crée presque aucun changement au niveau de la proportion du retard, en passant d'un pourcentage de 13% à 12% pour les curatifs 14. Puisque, nous donnons plus de flexibilité pour accélérer la prise en charge dès l'arrivée d'une demande (en particulier, pour les patients ayant un cancer « sein » ou « métastase »), le problème réside encore entre la consultation et le CT-SIM. Comme expliqué dans l'analyse de l'existant, cette attente vient du fait qu'un patient curatif ne peut recevoir son CT-SIM que si son médecin auquel il était affecté dans la consultation, a une activité de type planification.

Tableau 5.7: Proportion de retard pour le scénario 2

Catégorie	Patients traités en retard	
	Initial (%)	Scénario (%)
<b>P1</b>	36	36
<b>P2</b>	24	24
<b>P3</b>	13	12
<b>P4</b>	0	0



Il serait bénéfique d'opter pour une combinaison des deux scénarios « 1 » et « 2 » afin de déterminer si ces interventions suffiront d'assurer le respect des standards du temps d'accès.

### c) Scénario 3-Changement à l'horaire et aux compétences des oncologues

Une combinaison des deux scénarios « 1 » et « 2 » est évaluée afin d'étudier l'impact de ces deux changements sur le temps d'accès des patients et en particulier, sur ceux qui sont curatifs. Nous présentons un changement à l'horaire et aux compétences des oncologues.

- **Analyse des délais**

Dans ce scénario, 2406 patients ont été traités (environ plus 0.01 % par rapport au scénario initial). Le tableau 5.8 présente le nombre des patients traités en dehors des délais ainsi que les pourcentages associés.

Tableau 5.8: Proportion de retard pour le scénario 3

Catégorie	Patients traités	Proportion de retard (%)	
		Initial	Scénario 3
<b>P1</b>	103	36	37
<b>P2</b>	414	24	25
<b>P3</b>	1543	13	7
<b>P4</b>	339	0	0

D'après le tableau 5.8, nous pouvons noter que ce changement apporte une amélioration importante au niveau de la proportion des patients curatifs traités en retard. Aucun changement n'est noté au niveau des patients palliatifs puisque ce scénario a été lancé pour régler les problèmes rencontrés chez les curatifs.

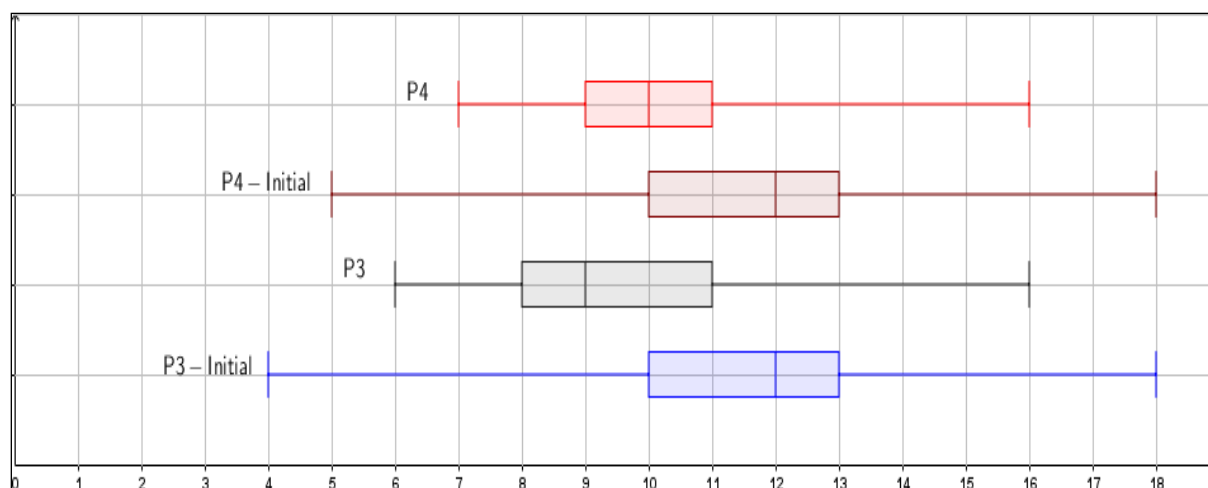


Figure 5.13: Comparaison des temps d'accès pour les curatifs 14 et les curatifs 28

D'après la figure 5.13, nous remarquons que ce changement réduit les temps d'accès pour les patients curatifs (de même pour le premier scénario). Il semble que cette réduction soit due à la diminution des délais entre la consultation et le CT-SIM. Les patients curatifs reçoivent, alors, leurs traitements, plus rapidement que dans le scénario initial. En moyenne, nous passons de 11,74 à 10,01 jours pour les patients curatifs 14 et 12,15 à 10,37 pour les patients curatifs 28. Ainsi, nous concluons que l'efficacité de l'utilisation des oncologues et l'introduction la flexibilité par rapport aux compétences, ont un effet d'amélioration plus important que celui de l'augmentation de la capacité. Évidemment, cette amélioration se traduit par une réduction des temps d'accès seulement pour les curatifs seulement.

#### d) Scénario 4-Réservation des plages pour les patients palliatifs sur les accélérateurs linéaires

En analysant l'état actuel du CICL, nous remarquons que, majoritairement, ce sont les patients palliatifs qui ne reçoivent pas leur traitement dans les délais et doivent attendre parfois la fin de semaine pour relancer leurs processus de traitement. Bien que le processus de préparation comprenne plusieurs étapes, la problématique principale réside dans la phase d'attribution des rendez-vous sur les accélérateurs linéaires. Quand la capacité disponible ne répond pas aux demandes, les gestionnaires peuvent personnaliser la quantité de plages allouées aux patients palliatifs afin d'assurer le respect des délais. C'est ce qu'on appelle le « *Fast-tracking* » ou « Suivi rapide » : par définition, c'est la réservation d'une capacité dédiée aux patients urgents pour réduire leurs temps d'attente. Concernant l'implémentation informatique, nous avons créé dans les

calendriers des accélérateurs, un ensemble de plages de type réservé ayant une date de début et une date de fin.

- **Quantité des patients traités**

Dans ce scénario, nous remarquons que la quantité des patients traités est légèrement réduite, par rapport au scénario initial : seulement 2401 patients traités. En contrepartie, le nombre des patients palliatifs traités est légèrement augmenté.

Tableau 5.9: Patients traités et proportion de retard pour le scénario 4

Catégorie	Patients traités	Patients consultés en retard		Patients traités en retard	
		Nombre	%	Nombre	%
<b>P1</b>	110	0	0	30	28
<b>P2</b>	424	0	0	96	22
<b>P3</b>	1534	0	0	154	10
<b>P4</b>	333	0	0	0	0

Par la réservation de 5 plages de traitement, la proportion des patients palliatifs ne respectant pas les délais est diminué sans augmenter le pourcentage du retard chez les curatifs.

- **Taux d'utilisation des accélérateurs linéaires**

Ce changement a été proposé afin de réduire les délais pour les patients palliatifs. En optant pour cette stratégie, nous remarquons une diminution de l'utilisation pour les quatre accélérateurs linéaires.

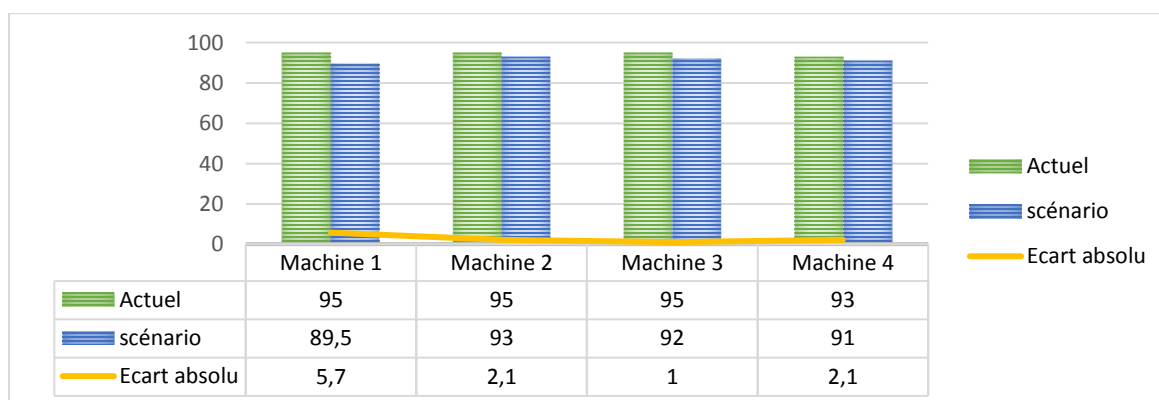


Figure 5.14: Comparaison de taux d'occupation des accélérateurs linéaires entre l'état actuel et le scénario 4

Comme le montre la figure 5.14, le taux d'utilisation diminue de 95 % à environ 92%. En effet, la réservation de plusieurs plages pour des patients palliatifs potentiels, qui ne sont pas encore référés au centre, entraîne une sous-utilisation de certaines plages. Brièvement, ceci ne permet toutefois pas de traiter l'ensemble des patients palliatifs dans les délais et entraîne également une diminution de l'utilisation des accélérateurs linéaires. Donc, cette politique a un impact de désynchronisation entre la capacité (traduit sous la forme de plages allouée) et la demande des patients palliatifs référés. Ce qui implique une sous-utilisation de la capacité disponible pour les palliatifs et une réduction de la capacité globale requise pour les curatifs.

Brièvement, nous constatons qu'il faut trouver le nombre optimal des plages à consacrer aux patients palliatifs, de façon à refléter l'incertitude liée à l'arrivée des patients. Pour ce faire, nous voyons l'importance de développer un modèle de prédiction d'arrivée des patients palliatifs pour pouvoir calculer le nombre de plages à réserver sur une base journalière.

Bien que ce scénario semble procurer des bons résultats par rapport à la proportion des patients traités en retard pour les patients palliatifs, il semble que des interventions supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la performance du CICL concernant le respect de la grille d'accès pour tous les patients. Donc, à part ces scénarios, d'autres améliorations sont possibles dans le but de fournir des recommandations assurant la conformité à la grille de classification du processus de soins de radiothérapie. En effet, l'une des suggestions pour les futurs scénarios est d'enquêter sur les règles de priorité pour certains groupes des patients.

#### **e) Gestion des priorités dans les files d'attente**

Un des problèmes rencontrés dans ce projet est la gestion des priorités entre les patients curatifs 14 et les curatifs 28 qui sont traités selon leurs dates de référencement FIFO. C'est la règle la plus adoptée en pratique dans la gestion de file d'attente; elle procure aux patients un sentiment de justice, bien qu'elle en pénalise quelques-uns dont les délais de traitement prescrits par les standards sont moins courts. Ceci fait en sorte qu'elle ne distingue pas entre deux patients de priorités différentes et qu'elle augmente le taux de retard chez les curatifs 14. Il est évident que les patients dont la priorité est la moins élevée pourraient attendre plus longtemps que ceux dont la priorité est plus élevée. Donc, le FIFO n'est plus applicable dans les centres radio-oncologique puisqu'il n'assure pas le respect des délais

Comme présenté précédemment, les règles de gestion sont multiples avec différents avantages et inconvénients. Plus particulièrement, La méthode EDD est la mieux adaptée pour la gestion des files d'attente dans les hôpitaux puisqu'elle consiste à extraire de la file d'attente, le patient dont l'échéance est la plus proche et la plus critique et assure par la suite l'équité entre les patients.

Dans cette section, nous étudions l'application de plusieurs règles d'ordonnancement dans la planification des rendez-vous des patients afin d'établir une référence pour comparer les résultats.

#### ❖ Scénario 5-Application de la règle « EDD »

La règle EDD séquence les dossiers des patients par date d'échéance.

- **Quantité des patients traités**

A l'application de cette règle, en moyenne 2410 patients ont été traités (Environ +0.5% par rapport au scénario initial). Le tableau suivant présente le nombre moyen des patients traités par catégorie ainsi que le nombre de ceux traités en dehors des délais.

Tableau 5.10: Patients traités et proportion des retards pour le scénario 5

Catégorie	Patients traités	Patients consultés en retard		Patients traités en retard	
		Nombre	%	Nombre	%
<b>P1</b>	109	0	0	32	29.36
<b>P2</b>	425	0	0	95	22.36
<b>P3</b>	1529	0	0	218	14
<b>P4</b>	347	0	0	0	0

Ce changement de règle fait, considérablement, diminuer le pourcentage du retard chez les patients palliatifs bien qu'il augmente légèrement la proportion des patients curatifs 14 traités hors les délais (de 13% à 14%). Ceci est expliqué par le fait que la règle a donné la priorité aux patients les plus urgents ayant moins de jours pour commencer leur traitement sans prendre en considération l'impact sur la prise en charge des patients qui sont déjà dans la file d'attente et qui ont un grand nombre de traitements à faire.

- **Analyse des délais**

En analysant les délais, nous remarquons que l'application d'EDD fait en sorte que les patients palliatifs (P1 et P2) attendent moins longtemps que dans le scénario initial pour commencer leurs

traitements. En effet, ce changement permet de diminuer la valeur maximale de temps d'accès de 4 à 2 jours pour les P1 et de 7 à 5 jours pour les P2. Cependant, les curatifs reçoivent leur traitement plus tard que le scénario actuel (11,74 à 12,31). D'après la figure 5.15, nous pouvons constater que cette perturbation vient de fait que 25% des patients curatifs attendent plus de 7 jours pour commencer leur traitement après le CT-SIM. La planification sur les accélérateurs linéaires est la source principale d'attente des patients curatifs.

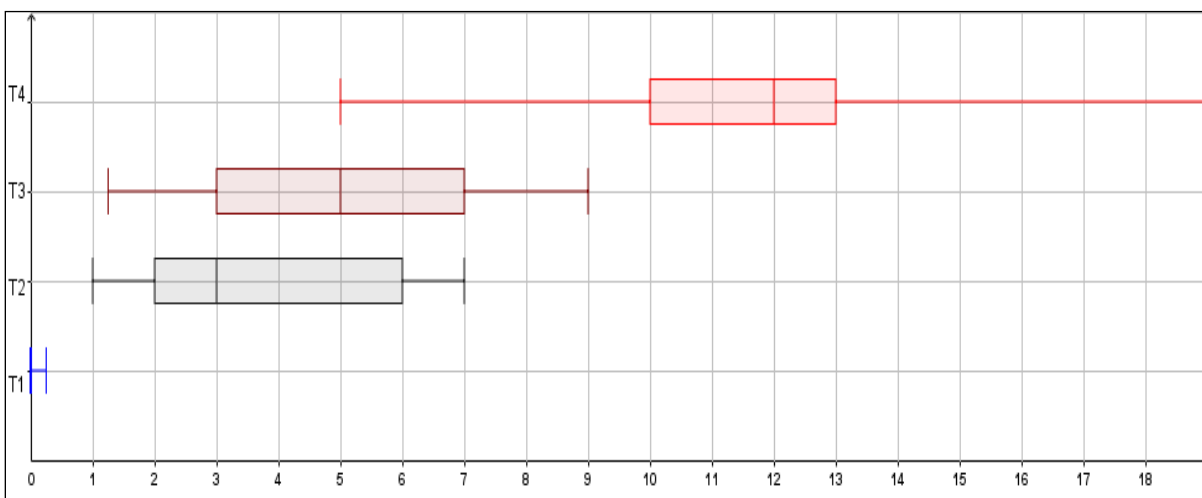


Figure 5.15: Délai entre les rendez-vous des patients curatifs 14 (P3)

La règle utilisée donne souvent des bons résultats lorsque nous visons à diminuer les retards pour les patients urgents et palliatifs. Cependant, elle s'avère cependant pénalisante pour les curatifs 14 dans cas où donner la priorité à un patient palliatif déjà en retard, va créer encore plus de retard pour les patients curatifs en attente dans la file. En outre, le nombre de traitements est variable d'un type de cancer à un autre et le fait de donner priorité en utilisant EDD à un patient peut entraîner un retard d'autres patients dont le nombre de traitements est plus court et qui ont pu être traités rapidement. Donc, l'application d'EDD n'est pas toujours favorable dans notre contexte vu sa vision myope prenant en considération, seulement, les dates d'échéance et les priorités des patients et négligeant la variabilité de nombre de traitements. A la lumière de ces résultats, il apparaît évident qu'il faut utiliser une règle prenant en considération la priorité et le nombre de traitements.

#### ❖ Scénario 6-Application de la règle « criticité »

La vision limitée d'EDD nous a amenée à définir une nouvelle règle de priorité pouvant hiérarchiser la prise en charge des patients lors de la phase de planification sur les accélérateurs

linéaires. Autrement dit, une règle permettant de détecter les patients les plus critiques et de prévoir les conséquences ainsi que les risques potentiels liés au non-respect des délais pour un patient donné. L'idée est de créer une règle combinant entre le principe d'EDD et celui du SPT (*Shortest processing time*: l'idée de cette règle est de faire au plus tôt les patients ayant le plus petit nombre de traitements) de façon à donner la priorité aux patients les plus urgents ayant le plus petit nombre de traitements pour les planifier en premier. D'ailleurs, le SPT permet de diminuer la taille de la file d'attente au sein du centre et de traiter le nombre maximum des patients.

Pour ce faire, nous optons pour une méthode permettant d'attribuer une criticité pour chaque patient, par rapport à laquelle il serait possible de trier la file d'attente et d'extraire celui ayant la criticité la plus petite. La criticité va être définie comme étant une fonction dont les paramètres sont les suivants :

- La gravité quantifiée par le nombre de jour restant pour l'échéance visée;
- La fréquence quantifiée par le nombre de traitements.

Donc, nous évaluons la criticité par patient  $p$  comme étant le produit de ces deux paramètres:

$$F_p = \text{Gravité} * \text{Fréquence}$$

- **Quantité des patients traités**

La nouvelle règle implémentée dans notre simulateur a permis de traiter, en moyenne, 2412 patients (environ +1 % par rapport au scénario initial). Le nombre des patients moyen traités par catégorie ainsi que le nombre de ceux traités en dehors des normes sont présentés dans le tableau 5.11.

Tableau 5.11: Patients traités et proportion de retard pour le scénario 6

Catégorie	Patients traités	Patients consultés en retard		Patients traités en retard	
		Nombre	%	Nombre	%
<b>P1</b>	108	0	0	27	25.53
<b>P2</b>	421	0	0	80	18.73
<b>P3</b>	1542	0	0	195	12.7
<b>P4</b>	341	0	0	0	0

Ce changement permet d'atténuer le nombre des patients traités en retard autant pour les palliatifs que pour les curatifs. En effet, la règle donne la priorité aux patients les plus critiques (en termes d'échéance) ayant moins de traitements. Autrement, elle priorise les patients impliquant le moins de charge afin de libérer les ressources le plus tôt possible et pouvoir prendre en charge, plus rapidement, les patients en attente.

- **Analyse des délais**

Évidemment, cette règle permet de traiter plus des patients et d'atténuer le pourcentage des patients traités hors des délais. Par conséquent, la règle définie fournit de bons résultats en termes de minimisation du nombre des patients en retard. Par contre, elle présente une certaine faiblesse vis-à-vis du temps d'attente maximal. La raison pour laquelle cela se produit est détectée au cours de la gestion de la file d'attente. En effet, lors de la phase de planification, les patients ayant moins de traitements et moins de jours d'attente vont être pris en charge avant ceux qui ont plus de traitements. Dans ce cas, ces patients, qui sont essentiellement des curatifs, vont attendre plus longtemps et la valeur maximale du temps d'accès va augmenter par rapport au scénario initial : de 18 à 19 jours pour les curatifs 14 et de 18 à 20 pour les curatifs 28. Donc, ces résultats indiquent que même si le pourcentage du retard est plus faible que dans le scénario initial, les patients qui ont été déjà traités en retard causent une augmentation de la durée du retard maximale.

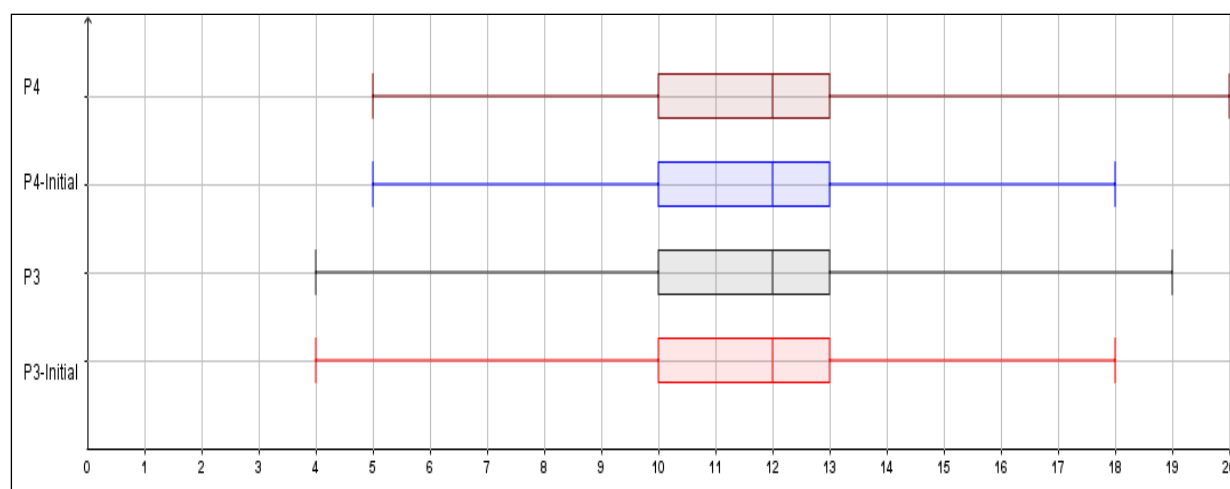


Figure 5.16: Comparaison des temps d'accès pour les curatifs 14 et les curatifs 28

Pour conclure, cette règle produit toujours des résultats satisfaisants. Elle est aussi performante et souvent meilleure que l'EDD, quand le pourcentage de retard et le nombre de patient traités sont



les deux mesures du rendement dans le système global. Néanmoins, dans un centre radio-oncologique, la durée du retard maximale doit être prise en considération, atténuée et optimisée pour tous les types des patients vu qu'elle est associée à des effets indésirables liés à une diminution des chances de rémission du cancer. Donc, il serait intéressant d'étudier la possibilité de développer une règle permettant d'évaluer la file d'attente des patients par rapport aux critères pondérés.

#### ❖ Scénario 7-Application d'une règle multicritères

Notre approche s'inspire du modèle d'évaluation utilisé dans « l'analyse hiérarchique des procédés ». L'AHP a été développé pour optimiser l'allocation des ressources lorsqu'il y a plusieurs critères à considérer. Dans une file d'attente, l'objectif est de choisir le patient le plus prioritaire, dépendamment des critères considérés, à savoir la minimisation du nombre des patients traités en retard ainsi que des temps d'accès et des temps d'attente. Pour ce faire, l'idée est de définir une fonction du coût total associé à la décision de planification d'un patient  $i$  de priorité  $p$  le jour  $n$ . Nous écrivons le coût total comme suivant :

$$\alpha d(i, n) + \beta b(i, n) + \gamma f(i)$$

- $d(i, n)$ :

$d(i, n)$  est le coût associé à la prise en charge en retard d'un patient  $i$  de priorité  $p$  le jour  $n$ . Le choix de  $d(i, n)$ , bien qu'il soit arbitraire, devrait inclure certaines caractéristiques. Il y a certainement un argument pour que  $d(i, n)$  augmente à un rythme plus rapide à chaque fois que le patient dépasse sa date limite de traitement. Il est aussi, raisonnable d'admettre qu'il est nul dans le cas où le patient a encore du temps avant de commencer le traitement.

Soit :

- $T(i)$  l'échéance de traitement d'un patient  $i$ ;
- $c_p$  le coût associé au retard d'un patient de priorité  $p$ ;
- $q_p$  le coût associé à la prise en charge d'un patient de priorité ;
- $c_{accél}$  la durée à réserver sur un accélérateur linéaire pour une séance de traitement;
- $N_i$  le nombre de séances de traitement pour un patient  $i$ .

Nous choisissons  $d(i, n)$  comme suit :

$$d(i, n) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{n-T(i)} c_p e^k, \forall n > T(i) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

- **$b(i, n)$ :**

$b(i, n)$  est le coût associé à la planification d'un patient  $i$  le jour  $n$ . Ce coût est également potentiellement difficile à quantifier. Pour cette raison, nous supposons qu'il dépend du nombre de jours restants pour l'échéance visée  $T(i)$  pour un patient  $i$ . Nous choisissons alors  $d(i, n)$  comme suit :

$$b(i, n) = \begin{cases} \sum_{k=n}^{T(i)} q_p e^k, \forall n \leq T(i) \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

- **$f(i)$ :**

$f(i)$  est le coût d'utilisation des ressources durant le traitement du patient  $i$ . La source la plus évidente est celle de l'utilisation des accélérateurs linéaires et qui est indépendante de la de priorité à planifier. Cependant, il peut être plus difficile de déterminer le coût pour d'autres ressources comme les technologues qui assistent aux séances de traitement. Ce coût dépend de la capacité à réserver pour un patient  $i$  durant les  $N$  traitement à faire. Donc, nous définissons  $b(i, n)$  comme suit :

$$f(i) = c_{accél} N_i$$

Pour évaluer les différents coûts, cités ci-dessus, nous utilisons des grilles d'évaluation adaptées au problème à étudier. Les différents coûts sont notés la plupart du temps de 1 à 10, dépendamment, de la priorité des patients.

L'objectif est de maintenir pour chaque catégorie des patients des temps d'attente raisonnables tout en assurant une utilisation optimale des accélérateurs linéaires. Cependant, il peut être difficile de déterminer le poids de chacun de ces critères. Nous testons une variété d'alternatives tout en changeant les valeurs de poids afin d'étudier le comportement de cette politique de gestion de la

file d'attente ainsi que son impact sur les mesures de performance définies. Les alternatives lancées sont présentées dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12: Différents alternatives de poids

	Paramètres de contrôle		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
<b>Alternative 1</b>	0.25	0.5	0.25
<b>Alternative 2</b>	0.5	0.25	0.25
<b>Alternative 3</b>	0.25	0.25	0.5
<b>Alternative 4</b>	1	1	1

- **Quantité des patients traités**

La section courante rapporte les résultats de l'utilisation de la simulation pour étudier le comportement de cette la politique dans plusieurs conditions de pondération.

Tableau 5.13: Patients traités et proportion de retard dans les 4 alternatives pour le scénario 7

	Patients traités	Patients traités				Pourcentage de retard (%)			
		P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Scénario initial	2405	106	419	1541	339	36	24	13	0
Alternative 1	2410	107	421	1542	340	21.2	18.74	13.1	0
Alternative 2	2413	109	421	1545	339	20.5	17.8	10.5	0
Alternative 3	2406	104	419	1541	339	29.2	23.1	14.3	0
Alternative 4	2411	107	421	1542	341	21.3	18.92	13.2	0

Dans la suite d'analyse, nous nous intéressons seulement à la deuxième alternative puisqu'elle procure les meilleurs résultats en termes du nombre des patients traités ainsi que la proportion des patients traités en dehors des délais.

En se basant sur l'alternative 2, le changement fait diminuer le nombre des patients traités en retard pour les palliatifs autant que pour les curatifs. En effet, cette alternative donne plus d'importance au coût de planification qui augmente considérablement à chaque fois, le patient s'approche de sa

date limite de traitement. De cette façon, elle permet de prioriser un patient dont l'échéance va prendre fin prochainement (par rapport au jour de la planification).

- **Analyse des délais**

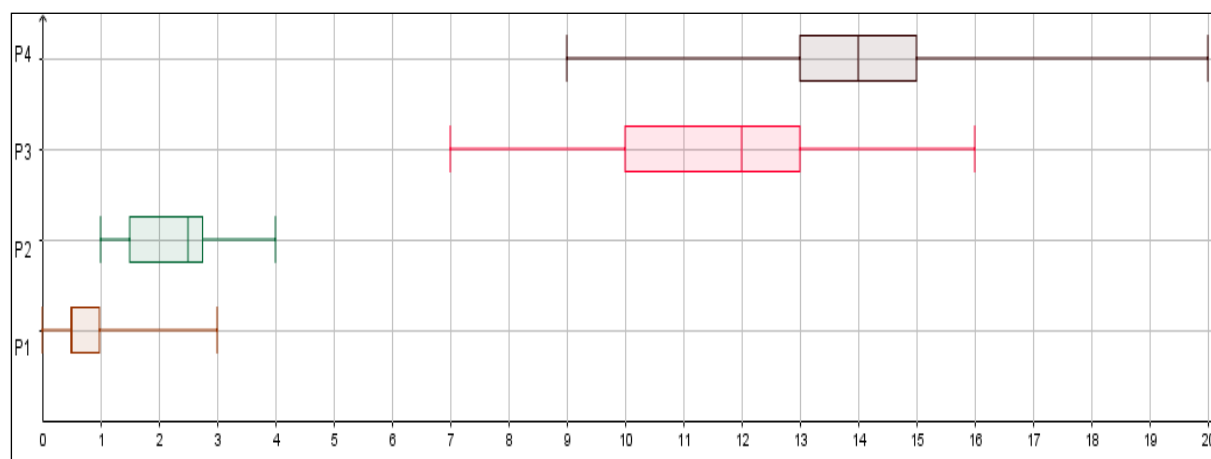


Figure 5.17: Temps d'accès pour les quatre catégories

D'après la figure 5.17, nous remarquons que ces règles assurent une politique de priorisation permettant de différencier la prise en charge entre tous les patients, particulièrement, pour les curatifs. Cette règle entraîne une augmentation des temps d'accès chez les curatifs 28. Certes, il s'agit d'une augmentation de plus de deux jours, mais, les patients curatifs 28 seront toujours traités à l'intérieur des délais. Ainsi, cette prolongation dans le début de traitement pour certains patients dont les délais sont plus longs assure plus de plages libres et plus de flexibilité au niveau de la capacité. Ceci permet de prendre en charge le plus tôt possible les patients prioritaires ayant les délais sont proches.

Brièvement, la gestion des files d'attente est un processus vital à l'optimisation des performances dans un centre radio-oncologique. Le choix de la règle à utiliser dans cette gestion doit être appliqué selon le critère désiré ou selon un compromis entre les différents critères. L'objectif principal de cette partie est de donner un aperçu sur la procédure de détermination des règles à utiliser pour gérer la planification des patients. Cette étude permettra de recenser les classements des règles par ordre d'efficacité. Le tableau 5.14 résume et compare l'ensemble des scénarios testés.

Tableau 5.14: Résumé des scénarios

		Initial	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6	Scénario 7
Nombre des patients traités	P1	106	103	106	103	<b>110</b>	109	108	109
	P2	419	414	419	414	<b>424</b>	<b>425</b>	421	421
	P3	1541	1543	1541	1543	1534	1529	1542	<b>1545</b>
	P4	339	<b>342</b>	339	339	333	347	341	339
Pourcentage de retard (%)	P1	36	37	36	37	28	29.36	25.53	<b>20.53</b>
	P2	24	25	24	25	22	22.36	<b>18.73</b>	<b>18.74</b>
	P3	13	<b>6</b>	12	<b>7</b>	10	14	12.7	10.5
	P4	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Délai entre l'arrivée et le premier traitement (temps d'accès moyen en jour)	P1	1.67	1.69	1.67	1.65	1.42	<b>1.46</b>	<b>1.52</b>	<b>1.32</b>
	P2	3.46	3.48	3.46	3.44	2.62	<b>2.73</b>	<b>2.93</b>	<b>2.72</b>
	P3	11.74	10.53	11.73	10.01	12.53	<b>11.94</b>	<b>11.62</b>	<b>10.39</b>
	P4	12.15	10.95	12.12	10.37	12.73	<b>13.35</b>	<b>13.93</b>	<b>13.96</b>
Utilisation des accélérateurs linéaires		95%	95%	95%	95%	92%	<b>95%</b>	<b>95.2%</b>	<b>95.5%</b>

En analysant les résultats du tableau 5.14, nous constatons que l'utilisation des règles de gestion des files permet des améliorations importantes au niveau des délais de traitements pour toutes les catégories des patients. De plus, nous remarquons que ces règles assurent une politique de priorisation permettant de différencier la prise en charge entre les curatifs 14 et les curatifs 28. Ceci entraîne directement une augmentation des temps d'accès chez les curatifs 28 qui sont toujours traités à l'intérieur des délais. Ainsi, il est intéressant de retarder le début de traitement pour ces patients afin de donner plus de plages libres et de flexibilité au système pour prendre en charge, le plus tôt possible, les patients prioritaires.

Bien que les autres scénarios de 1 à 4 procurent des bons résultats impliquant, ils n'impliquent souvent qu'une partie des patients et non pas la totalité. Évidemment, sans l'utilisation des modèles d'optimisation pour le choix des rendez-vous, une amélioration dans la prise en charge des patients palliatifs entraîne une augmentation des délais des patients curatifs et vice versa.

### **5.3 Discussion et Recommandations**

Quelques changements pourraient être envisagés afin d'améliorer les politiques de prise en charge des patients. Tout d'abord, il serait primordial d'utiliser une règle de gestion des files d'attente pour les patients curatifs et palliatifs. Selon les critères de performance, une règle peut sembler meilleure que l'autre mais plusieurs règles donnent des bons résultats pour les patients palliatifs et s'avèrent pénalisantes pour les curatifs. Donc, il semblerait bénéfique de mettre en place deux files d'attente séparées: une pour les patients palliatifs et l'autre pour les curatifs. Avec des files d'attente séparées, nous pouvons appliquer la règle la plus adaptée pour chacune. Évidemment, EDD fonctionne mieux avec les patients palliatifs alors que LPT performe mieux avec les patients curatifs.

Par contre, ceci entraîne un problème majeur lié à la gestion simultanée : les deux files d'attentes ne peuvent pas être actives au même temps. Donc, notre recommandation est d'utiliser la méthode de priorisation multicritère afin d'assurer, d'une part, la vision globale de tous les patients dans une même liste d'attente et d'autre part, l'évaluation de leur priorité et leur rang pour commencer le traitement par rapport à plusieurs critères.

Pour la gestion des rendez-vous des patients palliatifs, la réservation d'un nombre de plages horaires sur une base quotidienne, pourrait être une solution dans les centres radio-oncologiques. Cependant, cette politique présente des inconvénients majeurs. Elle entraîne une réduction du taux

d'utilisation des accélérateurs linéaires: un nombre fixe des blocs est réservé pour des patients palliatifs qui peuvent arriver ou non. Par la suite, ceci entraîne directement une diminution de la capacité disponible pour les curatifs ainsi qu'une augmentation des délais. Notre recommandation est l'intégration d'un modèle de prédiction permettant de calculer le nombre de blocs à réserver sur une base journalière. C'est un excellent outil à utiliser en complément du modèle de simulation.

Lorsqu'un patient curatif est référé à un centre radio-oncologique, il est censé entrer avoir une consultation avec un médecin. Ensuite, il ne peut recevoir son scan que si son médecin auquel il est affecté, a une activité de type planification. Avec les changements apportés à l'horaire des médecins, nous remarquons une amélioration au niveau des délais entre la phase de consultation et la phase de CT-Sim. Ce calendrier fonctionne et permet de préparer les patients en moyenne 5 jours tout en améliorant la coordination avec les autres spécialistes. En effet, les résultats montrent qu'une meilleure planification des activités des oncologues, peut réduire considérablement les temps d'accès et éviter les goulots d'étranglement tout au long du processus de prise en charge.

Finalement, l'attente est un peu longue pour la phase de dosimétrie et affecte directement la proportion des patients curatifs traités en dehors des délais. Cette attente provient de la complexité du plan de traitement. En pratique, les dosimétristes ont des niveaux d'expérience différents qui affectent directement la rapidité de la réalisation des de traitements. Notre recommandation est d'attribuer à chaque dosimétriste un niveau de compétence, dépendant de la combinaison cancer/plan. Ceci permet la standardisation les tâches de dosimétristes ainsi que l'efficacité des opérations afin de réduire les délais d'attente.

## **5.4 Conclusion et perspectives**

Le modèle de simulation proposé permet de modéliser plusieurs alternatives de trajectoires et de planifier l'ensemble des patients tout au long du processus de prise en charge dans les centres radio-oncologiques. Ce modèle est également utilisé pour analyser des différentes approches de gestion de files d'attente. Cette analyse montre que le nombre des patients traités peut être augmenté en intégrant la politique adéquate. Notre modèle est fait en sorte qu'il serait réutilisé par d'autres chercheurs au travers de ses fonctionnalités flexibles. Ainsi, la rapidité d'exécution est, également, un avantage majeur si nous voulons exécuter rapidement des centaines de répliques afin d'assurer un bon niveau de fiabilité par rapport au meilleur scénario.

Tel que nous avons observé dans la clinique du CICL, les changements aux procédures seulement, ne peuvent pas systématiquement apporter des meilleurs résultats. Donc, l'outil que nous proposons, relève des points qu'il faudrait prendre en considération dans les futurs travaux pour améliorer l'état du système de santé. Une première approche à proposer, vise à optimiser la politique de planification des rendez-vous sur les accélérateurs linéaires. Autrement dit, une approche permettant de planifier les patients en tenant compte de leur priorité, de leur délai d'attente et de la durée de traitement. Pour ce faire, nous insistons sur l'importance d'intégrer dans le simulateur, un modèle d'optimisation en ligne stochastique (Legrain et al., (2014)): une méthode hybride prenant en considération l'incertitude liée à l'arrivée des patients au centre et qui ne nécessite aucune réservation de plages horaires pour des patients urgents.

Une seconde approche de modélisation qu'il serait intéressant d'explorer consiste à découper plus finement le déroulement de l'étape de traitement en elle-même. Cette approche aurait comme objectif de permettre une meilleure coordination des traitements et d'étudier la possibilité d'échanger les flux entre les salles. En effet, nous pouvons découper le traitement en trois sous-étapes: i) la préparation de la séance contenant l'accueil et le positionnement du patient, ii) l'obtention du faisceau, son calibrage et le tir en lui-même, et enfin iii) la sortie du patient de la salle. Il faut, alors, tenir compte le temps nécessaire pour calibrer et rediriger le faisceau ainsi que l'éventuel changement de particules à effectuer. Pour ce faire, nous insistons sur l'importance de modéliser ces flux et d'intégrer un modèle de prédiction des durées de traitement sur les accélérateurs linéaires.

## 5.5 Limites du modèle de simulation

Notre étude montre plusieurs avantages, certes, mais nous soulignons quelques limites du modèle développé:

- **Utilisation des données du CICL** : il faut prévoir récupérer d'autres données des différents centres radio-oncologiques afin de tester le niveau de réutilisation de notre modèle de simulation ;
- **Implémentation d'autres flux de traitement**: la radiothérapie requiert encore un nombre très important d'innovations technologiques. Ce qui fait qu'il existe d'autres types de



traitements qu'il faut intégrer dans le modèle de simulation (Traitement à une seule fraction).

- **Modélisation des annulations des patients:** bien que ce ne soit qu'un faible pourcentage, il paraît important de modéliser les patients qui arrêtent leur traitement.

Toutes ces limites vont faire l'objet d'une étude intense dans les prochains travaux.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION

Dans la lutte contre les pathologies cancéreuses, plusieurs modalités de traitement existent, parmi les plus répandues nous notons la chirurgie, la chimiothérapie et la radiothérapie. Cette dernière présente un traitement de référence, permet de traiter plus que la moitié des patients au Canada. Cependant, les processus d'activités associés à cette technique présentent des particularités rendant sa réalisation difficile dans des délais courts. En effet, la relative rareté des ressources humaines et ressources matérielles ainsi que, le nombre élevé des séances à suivre limitent fortement la rapidité de son exécution. En outre, la trajectoire des soins suivie par un nouveau patient référé est complexe et constituée de nombreuses étapes se produisant à des moments planifiés, dans des lieux déterminés et avec des ressources spécifiques. En dépit de ces nombreuses contraintes, les délais de prise en charge doivent être réduits au maximum afin de maximiser les chances de rémission des patients. Donc, cette technologie nécessite une organisation complexe et les enjeux d'une optimisation de ces processus sont multiples tant du point de vue des patients que des structures des soins. En ce qui concerne les patients, les enjeux majeurs concernent la qualité des soins qui leur sont apportés et l'amélioration de leurs conditions de traitement, en particulier les temps d'attente.

Dans les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit, nous nous intéressons à la modélisation et la simulation de la trajectoire de soins tout au long du processus de prise en charge d'un nouveau patient référé. Ainsi, notre mission est de développer un modèle de simulation générique permettant de modéliser la trajectoire des patients et automatiser la planification des rendez-vous tout au long du processus de prise en charge. Ceci permet d'épargner du temps lors du choix d'une plage horaire, de réduire le nombre de ressources nécessaires à cet effet et surtout d'assurer à la fois une meilleure organisation des ressources et une réduction des temps d'attentes globaux.

Notre travail a commencé par rassembler nos efforts sur la prise et la collecte des données détaillées auprès du CHUM, CICL et de la littérature, tout en restant concentré sur la trajectoire des patients en radiothérapie. Grâce à ces données, nous avons retrouvé de nombreuses similitudes entre les différents centres radio-oncologiques. Les distinctions se sont observées au niveau de la capacité des ressources matérielles et humaines disponibles et des heures d'ouverture. Suite à ce constat, nous avons pu améliorer la modélisation de base de la trajectoire des patients. Tout d'abord, nous avons étendu la trajectoire de base en incluant les différents flux des patients ainsi que leurs

interactions avec les ressources humaines et matérielles. La seconde amélioration est le fait d'intégrer plusieurs ressources comme les technologues, les infirmières, etc. A l'issue de ces deux améliorations, nous avons obtenu une cartographie standard assurant une description complète des flux des patients.

Dans l'éventualité d'amener ce projet au niveau de l'outil de prise de décision, nous avons procédé à l'implémentation de notre modèle de simulation. Ce nouveau modèle a comme avantages de permettre: i) une analyse des flux des patients, afin de cibler avec précision les postes goulots, ii) une analyse sur les différentes règles de gestion des files d'attente, iii) un ajustement de la stratégie de gestion des rendez-vous pour les palliatifs ainsi que les curatifs. Malgré l'augmentation de la complexité dans la reproduction du processus de radiothérapie, les premiers résultats de validation obtenus grâce à ce modèle montrent des mesures similaires à celles obtenues pour la plupart des indicateurs de performance auprès de CICL.

Par ailleurs, nous avons amené ce projet à un autre niveau. Avec quelques modifications, le modèle de simulation a été utilisé pour tester des scénarios « What-if ». Les résultats de ces scénarios sont utiles pour analyser plusieurs approches de gestion et de planification et recommander celles qui optimisent le nombre des patients traités en retard. A travers ses fonctionnalités flexibles, le modèle peut être réutilisé par d'autres chercheurs et assure une rapidité d'exécution dans l'éventualité où nous voudrions exécuter des centaines de répliques dans des courts délais afin d'assurer un certain niveau de fiabilité.

Toutefois, le succès de ce modèle ne doit pas dissimuler les limites intrinsèques à une telle approche. Ces limites proviennent de fait que dans certains scénarios, les changements aux procédures seulement, ne peuvent pas assurer toujours des meilleurs résultats comme la réservation des blocs pour les patients palliatifs. Afin de surmonter ces limites, nous proposons d'intégrer un modèle d'optimisation stochastique pouvant minimiser le pourcentage des patients traités en retard, tout en maximisant l'utilisation des ressources. Une seconde approche de modélisation est intéressante et qui consiste à découper plus finement le déroulement de l'étape d'une séance de traitement en elle-même afin de permettre une représentation plus proche de la réalité et une coordination des traitements entre les différentes salles fonctionnelles. Dans ce contexte, des nouvelles contraintes apparaissent à savoir le temps nécessaire pour rediriger le faisceau ainsi que

le positionnement du patient à effectuer. Ces contraintes vont faire l'objet d'une implémentation dans notre modèle de simulation.

Pour conclure, les résultats obtenus au cours des travaux qui viennent d'être présentés, apportent des solutions à la fois pratiques et académiques à notre problématique de base et font surtout apparaître des nouvelles perspectives de recherche plus complexes mais plus précises afin d'optimiser la trajectoire des patients en radiothérapie.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Boucher, H. Beauregard, "Le coût économique du cancer au Québec, en 2008," Coalition Priorité Cancer au Québec, Montréal, Canada, Rapport Technique, 2010. [En ligne], Disponible : <http://www.informa.msss.gouv.qc.ca>
- [2] D. Gaëtane, L. Côté, M. Bordeleau, L. Cazale et I. Traoré, "Enquête québécoise sur la qualité des services de lutte contre le cancer 2008 : portrait statistique des personnes ayant reçu un traitement", Institut de la statistique du Québec, Québec, Canada, Rapport Technique ISBN 978-2-550-58440-7, 2010. [En ligne], Disponible [http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/sante/enq\\_cancer.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/sante/enq_cancer.htm).
- [3] Collège des médecins du Québec, "La gestion de l'accès aux services en RadioOncologie: pour une approche systématique," Collège des médecins du Québec et Ministère de la Santé et des Services sociaux, Québec, Canada, Énoncé de position ISBN 2-920548-15-8, 2004. [En ligne], Disponible : <http://www.cmq.org/fr/Medias/Profil/Commun/AProposOrdre/Publications/EnoncesGuidesLignes.aspx>
- [4] P. Sullivan, "For first time, unemployment line awaits group of new Canadian specialists," CMAJ: Canadian Medical Association Journal, vol. 156, pp. 1739-41, 1997. [En ligne]. Disponible: <http://www.ecmaj.ca/content/156/12/1739.full.pdf>
- [5] Santé et Service Sociaux Québec, " Accès aux services médicaux spécialisés," Santé et Service Sociaux Québec, 2012. [En ligne]. Disponible: <http://wpp01.msss.gouv.qc.ca/appl/g74web/tableaucomparatif.asp>
- [6] Santibáñez, P., Chow, V. S., French, J., Puterman, M. L., & Tyldesley, S., (2009). Reducing patient wait times and improving resource utilization at British Columbia Cancer Agency's ambulatory care unit through simulation. *Health Care Management Science*, 12(4), 392–407.
- [7] S. Almagoshi, (2015). Simulation modelling in healthcare: Challenges and trends. 6th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015. *Procedia Manufacturing*, 301 – 307.
- [8] Chabrol M., Gourgand M., Rodie S., (2010). Modélisation et évaluation des unités de soins. 8th International Conference of Modeling and Simulation MOSIM'10, Tunisia, May 10-12, 2010.

- [9] Y. Kowalski (2006) Aide à la décision par l'analyse sémantique et la simulation des interactions dans l'organigramme, modèle qualitatif général d'audit pour les entreprises. Université de Fribourg, Suisse.
- [10] Vernadat F., 1996 Enterprise Modeling and Integration – Principles and Applications, Chapman & Hall.
- [11] Artiba A., Briquet M., Colin J., Dontaine A., Gourc D., Pourcel C., Stock R., (2004). Modélisation d'établissement de santé. 2ème conférence francophone en Gestion et Ingénierie de Systèmes Hospitaliers (GISEH), Mons.
- [12] Zurn, P., Dal Poz, M., Stilwell, B. & Adams, O. (2002) Imbalances in the Health Workforce. World Health Organization, Geneva.
- [13] El Oualidi, M. A., & Saadi, J. (2013). Améliorer la prise en charge des urgences : apport de la modélisation et de la simulation de flux. Santé Publique, 25 433-439.
- [14] Navas, J.F., Arteta, C., Hadjes, P.S. et Jimenez, F. (2004). Construction et simulation d'un modèle de flux de patients dans le service d'urgences d'un hôpital colombien. Actes de la Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH04, 2004 Mons, Belgique, Septembre.
- [15] Besombes, B. et Merchier, L. (2004). Regroupement des Plateaux Médico- Techniques ; une basée sur la Modélisation d'entreprise à partir de GRAI. Acte de la Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH04, Mons, Belgique, Septembre.
- [16] Wiser, P.H., (2004). Les nouvelles technologies de l'information au service des urgences. Actes de la Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH04, Mons, Belgique, Septembre.
- [17] Wieser, P.H., Vermeulen. et Faure, S., (2002). Modélisation et ré ingénierie des systèmes hospitaliers. Actes de la Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers GISEH02, Lyon.
- [18] Trudeau, J. (2004). Impact de l'agent de liaison en santé mentale à la salle d'urgence. Actes de la Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, Mons, Belgique, Septembre.

- [19] Vadeboncoeur, D. et Baril, C., (2015). Validation d'un modèle de simulation d'une urgence pour patients ambulatoires. 11e CONGRES INTERNATIONAL DE GENIE INDUSTRIEL – CIGI2015 Québec, Canada.
- [20] Robinson S, Nance RE, Paul RJ, Pidd M and Taylor SJE (2004). Simulation Model Reuse: Definitions, Benefits and Obstacles. *Simulation Modelling: Practice and Theory*.
- [21] Brailsford S., Harper P., Patel B. and Pitt M. (2009). An Analysis of the Academic Literature on Simulation and Modelling in Healthcare, *Journal of Simulation*, 3, 130-140.
- [22] Sobolev B, Sanchez V, Vasilakis C (2010) Systematic review of the use of computer simulation modeling of patient flow
- [23] Mielczarek B. (2012) Simulation model to forecast the consequences of changes introduced into the 2nd pillar of the Polish pension system. *Economic modelling* 30, s. 706–714
- [24] Kneebone R, Nestel D, Wetzel C, et al: The human face of simulation: patient-focused simulation training. *Acad Med* 2006;81:919–924.
- [25] Fone, D., Hollinghurst, S., Temple, M., Round, A., Lester, N., Weightman, A., Roberts, K., Coyle, K., Bevan, G. and Palmer, S. (2003). Systematic review of the use and value of computer simulation modelling in population health and health care delivery. *Journal of Public Health Medicine*, 25(4), 325–335.
- [26] Katsaliaki, K., & Mustafee, N. (2010). Applications of simulation within the healthcare context. *Journal of the Operational Research Society*, 62(8), 1431–1451.
- [27] S.J. Thomas, M.V. Williams, N.G. Burnet, C.R. Baker, How much surplus capacity is required to maintain low waiting times? *Clin. Oncol.* 13 (2001) 24–28.
- [28] England W and Roberts S (1978). Applications of computer simulation in health care. In: Highland HJ, Hull LG and Neilsen NR (eds). *Proceedings of the 1978 Winter Simulation Conference*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Miami Beach, Florida, USA.
- [29] P.E. Joustra, R. Kolfin, N.M. van Dijk, C.C.E. Koning, P.J.M. Bakker, Reduce fluctuations in capacity to improve the accessibility of radiotherapy treatment cost-effectively, *Flex. Serv. Manuf. J.* 24 (4) (2012) 448–464.
- [30] Bikker IA, Kortbeek N, van Os RM, Boucherie RJ. Reducing access times for radiation treatment by aligning the doctor's schemes. *Operations Res Health Care*. 2015;7:111–21.

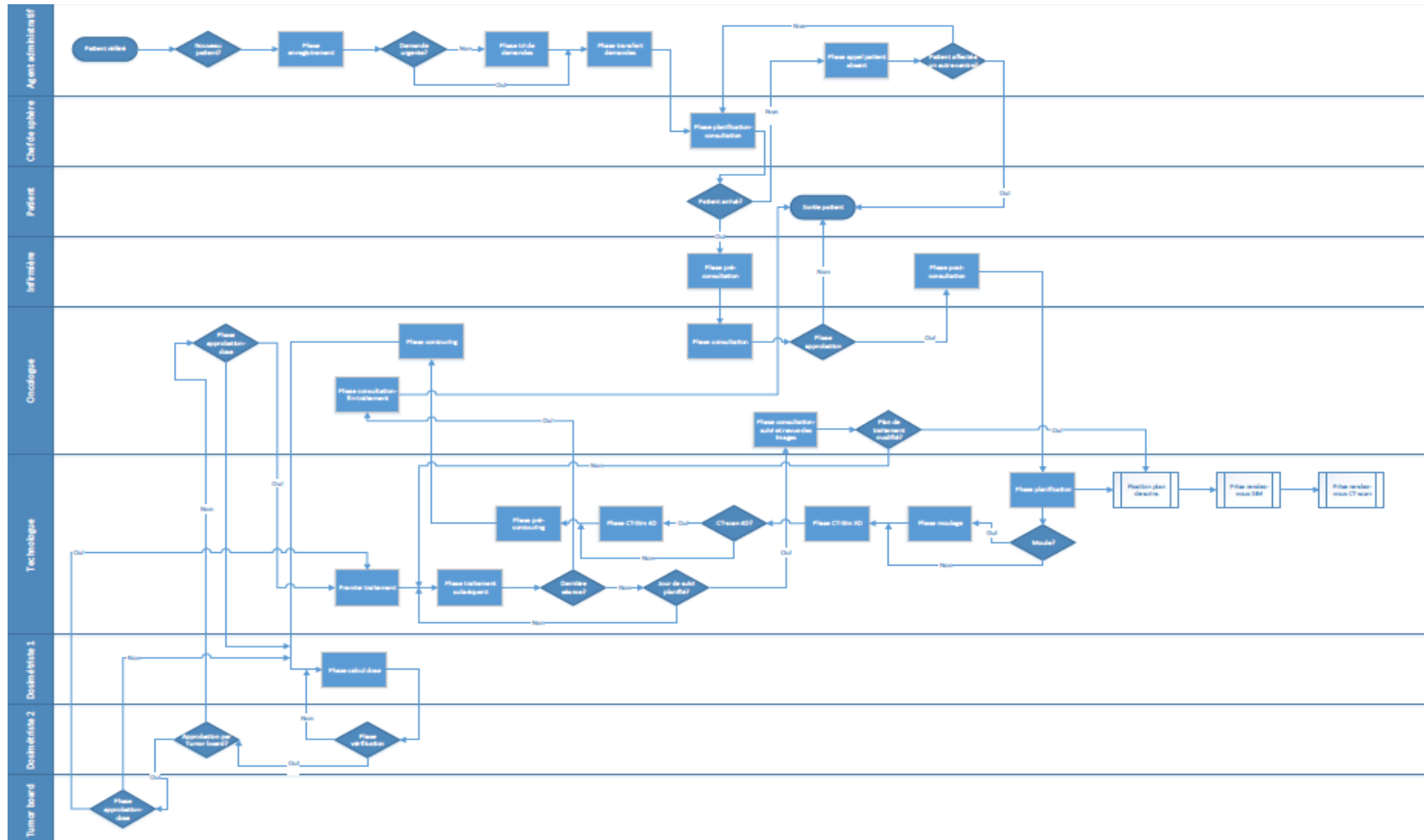
- [31] Lucius, A., and Brenner, G., 2010, “Unsteady CFD Simulations of a Pump in Part-Load Conditions Using Scale-Adaptive Simulation,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, 31, pp. 1113–1118.
- [32] Hirshberg A, Holcomb JB, Mattox KL. Hospital trauma care in multiple casualty incidents: a critical view. *Ann Emerg Med* 2001; 37: 647–52.
- [33] Proctor, S., Lehaney, B., Reeves, C., & Khan, Z. (2007). Modelling patient flow in a radiotherapy department. *OR Insight*, 20(3), 6-14.
- [34] Werker, G., Sauré, A., French, J., & Shechter, S. (2009). The use of discrete-event simulation modelling to improve radiation therapy planning processes. *Radiotherapy and Oncology*, 92(1), 76-82.
- [35] Santibáñez, P., Chow, V. S., French, J., Puterman, M. L., & Tyldesley, S. (2009). Reducing patient wait times and improving resource utilization at British Columbia Cancer Agency’s ambulatory care unit through simulation. *Health care management science*, 12(4), 392-407.
- [36] Taobane, M., (2012). Utilisation de la simulation pour améliorer les horaires des médecins et des équipements dans un département de Radio-Oncologie (Thèse de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).
- [37] Niroumandrad, N., (2015). Scheduling of Physicians to Minimize Patients’ Waiting Time. *Scheduling of Physicians to Minimize Patients’ Waiting Time*.
- [38] Beauchamp, E., (2015). Simulation du flux de patients en clinique externe (Thèse de maîtrise, École Polytechnique de Montréal).
- [39] T. Ruohonen, P. Neittaanmaki, J. Teittinen, Simulation Model for Improving the Operation of the Emergency Department of Special Health Care, in: *Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter, 2006*, pp. 453–458.
- [40] Pérez, E., Ntamo, L., Malavé, C. O., Bailey, C., & McCormack, P. (2013). Stochastic online appointment scheduling of multi-step sequential procedures in nuclear medicine. *Health care management science*, 16(4), 281-299.
- [41] Kapamara, T., Sheibani, K., Petrovic, D., Hass, O., & Reeves, C. (2007). A Simulation a radiotherapy treatment systems: A case study of a local cancer centre. In *Proceedings of the 2007 ORP3 conference* (pp. 29-35), Portugal, 12-15 September, 2007.
- [42] Gupta, D., B. Denton. 2008. Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities. *IIE Transactions* 40(9) 800–819.



- [43] Murray M, Berwick DM. Advanced access: reducing waiting and delays in primary care. *JAMA*. 2003;289:1035-1040.
- [44] Huang XM: Patient attitude towards waiting in outpatient clinic and its applications. *Health Serv Manage Res* 1994, 7(1):2-8.
- [45] Petrovic, D., Morshed, M., & Petrovic, S. (2011). Multi-objective genetic algorithms for scheduling of radiotherapy treatments for categorised cancer patients. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 6994-7002.
- [46] Petrovic D, Castro E, Petrovic S, Kapamara T. Radiotherapy scheduling. In: *Automated Scheduling and Planning*, vol. 505. 2013. p. 155–89.
- [47] Castro E and Petrovic S 2012 Combined mathematical programming and heuristics for a radiotherapy pre-treatment scheduling problem *Journal of Scheduling* 15 333–346.
- [48] Conforti, D., Guerriero, F., Guido, R.: Optimization models for radiotherapy patient scheduling. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* 6(3), 263–278 (2008).
- [49] Conforti, D., Guerriero, F., Guido, R.: Non-block scheduling with priority for radiotherapy treatments. *European Journal of Operational Research* 201(1), 289–296 (2010).
- [50] Conforti, D., Guerriero, F., Guido, R., Veltri, M.: An optimal decision making approach for the management of radiotherapy patients. *OR Spectrum* 33(1), 123–148 (2011)
- [51] Petrovic, S., Leung, W., Song, X., Sundar, S.: Algorithms for radiotherapy treatment booking. In: Qu, R. (ed.) *Proceedings of the Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group (PlanSIG)*, pp. 105–112 (2006).
- [52] Petrovic, S., Leite-Rocha, P.: Constructive approaches to radiotherapy scheduling. In: Ao, S., Douglas, C., Grundfest, W., Schruben, L., Burgstone, J. (eds.) *World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, pp. 722–727 (2008a).
- [53] Petrovic, S., Leite-Rocha, P.: Constructive and GRASP approaches to radiotherapy scheduling. In: Ao, S. (ed.) *Advances in Electrical and Electronics Engineering (IAENG) Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 (WCECS)*, pp. 192–200. IEEE Computer Society (2008b).
- [54] Sauré, A., Patrick, J., Tyldesley, S., & Puterman, M. L. (2012). Dynamic multiappointment patient scheduling for radiation therapy. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 573-584.

- [55] Liu N, Finkelstein S, Kruk M, Rosenthal D (2017) When waiting to see a doctor is less irritating: Understanding patient preferences and choice behavior in appointment scheduling. *Management Sci.* To appear. 7.2.
- [56] Legrain, A., Fortin, M.A., Lahrichi, N., Rousseau, L.M.: Online stochastic optimization of radiotherapy patient scheduling. *Health Care Management Science* 18(2), 110–123 (2015).
- [57] Berg, B. P., Denton, B. T., Ayca Erdogan, S., Rohleder, T., & Huschka, T. (2014). Optimal booking and scheduling in outpatient procedure centers. *Computers & Operations Research*, 50, 24–37.
- [58] Jun JB, Jacobson SH, Swisher JR. Applications of discrete-event simulation in health care clinics: a survey. *J Op Res Soc* 1999; 50(2): 109–123.
- [59] Rojo MG, Bueno G, Slodkowska J. Review of imaging solutions for integrated quantitative immunohistochemistry in the pathology daily practice. *Folia Histochem Cytobiol* 2009;47(3):349–54.
- [60] Pascal, C. (2000). Gérer les processus à l’hôpital : une réponse à la difficulté de faire ensemble. Thèse Science de Gestion. Université Jean Moulin Lyon III, p. 457.
- [61] Pascal, C.H. (2003). La gestion par processus à l’hôpital entre procédure et création de valeur. *Revue Française de Gestion*, Vol. 29, N° 146.
- [62] Abt, V. (2010). Une approche méthodologique et de modélisation des exploitations agricoles dans une perspective d'ingénierie d'entreprise et de système d'information. Unpublished Sciences de gestion, Dauphine Université, Paris.
- [63] Trilling, L., Guinet, A., Le Magny, D., (2006), Nurse scheduling using integer linear programming and constraint programming. *Proceedings of INCOM 06*, Saint Etienne, France.
- [64] Doumeingts, G., Vallespir, B., Zanettin, M. and Chen, D., 1992, GIM: GRAI integrated methodology, a methodology for designing CIM systems. Technical Report, GRAI/ LAP, Bordeaux, France, Version 1.0.
- [65] Strasser, T., Rooker, M., Hegny, I., Wenger, M., Zoitl, A., Ferrarini, L., Dede, A., Colla, M., 2009. A research roadmap for model-driven design of embedded systems for automation components. In: *7th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2009 (INDIN 2009)*, June 2009, pp. 564–569.
- [66] Noumeir R: DICOM structured report document type definition. *IEEE Trans Inf Technol Biomed* 7(4):318–328, 2003.

- [67] Kapamara, T., Sheibani, K., Haas, O. C. L., Reeves, C. R., & Petrovic, D. (2006, September). A review of scheduling problems in radiotherapy. In *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Systems Engineering (ICSE2006)*, Coventry University, UK (pp. 201-207).
- [68] Hoad, K., Robinson, S., & Davies, R. (2010). Automating warm-up length estimation. *Journal of the Operational Research Society*, 61(9), 1389-1403.
- [69] Hsu JH, Younan D, Pandalai S, Gillespie BT, Jain RA, Schippert DW et al. Use of computer simulation for determining endovascular skill levels in a carotid stenting model. *J Vasc Surg* 2004;40:1118–1125.



**ANNEXE B – SCHÉMA D'ÉTAPES DE TRAITEMENT D'UN PATIENT**